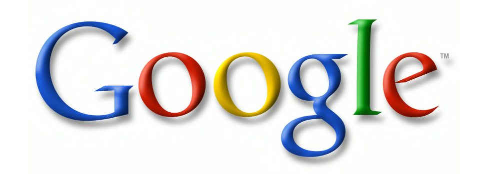


This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

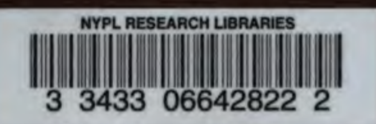
Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

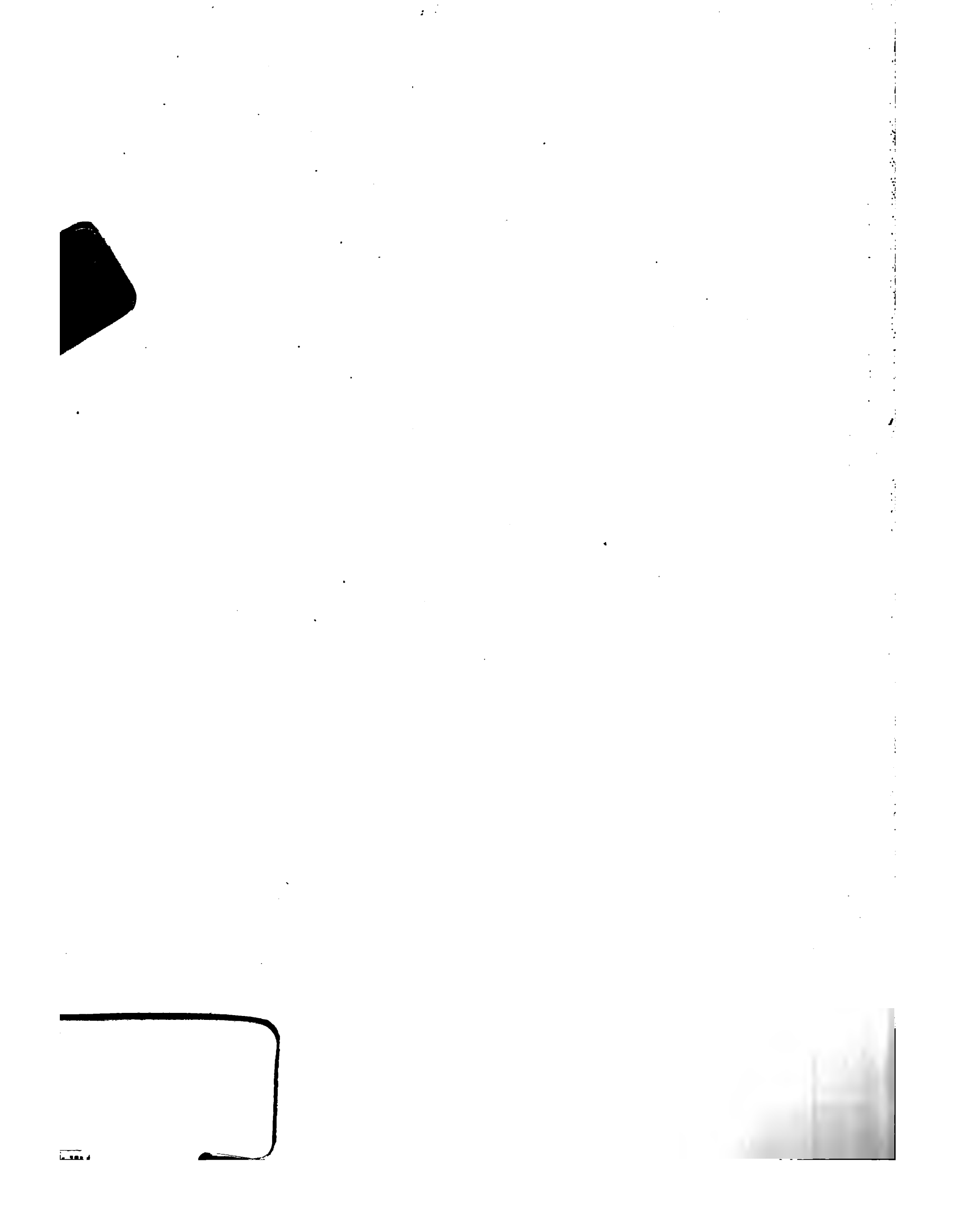
Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.
+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.
+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.


NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06642822 2







Der elektrische Strom

und seine wichtigsten Anwendungen.

Gemeinverständliche Darstellung

von

Prof. Dr. W. Bermbach
in Cöln.

Dritte, umgearbeitete und stark vermehrte Auflage.

Mit 237 Abbildungen.



Otto Wigand
Verlagsbuchhandlung und Buchdruckerei m. b. H.
Leipzig.

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
373802
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
R 1906 L

Alle Rechte vorbehalten.

Vorwort
zur dritten Auflage.

Das vorliegende Buch hat in dieser dritten Auflage eine sehr weitgehende Umgestaltung und starke Vergrösserung erfahren. Bei der Neubearbeitung liess ich mich von der Absicht leiten, ein populärwissenschaftliches Werk zu schaffen, in dem neben einem Überblick über die neueren Theorien der Elektrizitätslehre die wichtigsten Verwendungen, die der elektrische Strom im praktischen Leben findet, behandelt werden. Mathematische Entwickelungen werden, abgesehen von einigen wenigen elementaren Berechnungen, vermieden, so dass ein mit den einfachsten Grundbegriffen der Physik vertrauter Leser in der Lage ist, den Inhalt des Buches sich anzueignen.

Damit der Umfang des Buches nicht gar zu gross wurde, war eine sorgfältige Auswahl unter der grossen Fülle des vorhandenen Materials geboten; aus demselben Grunde wurden viele Abschnitte, die bei dem ersten Studium vielleicht übergangen werden können, klein gedruckt.

Die Geschichte der Elektrophysik und der Erfindungen ist eingehender berücksichtigt, als es sonst in Werken, die in der Anlage dem vorliegenden ähnlich sind, zu geschehen pflegt; es wird ihr meistens in jedem Kapitel ein besonderer Abschnitt gewidmet.

Manchem Leser dürften die an vielen Stellen eingeschobenen Bemerkungen über die Ausführung von Versuchen willkommen sein.

Die zahlreichen Illustrationen werden viel zum besseren Verständnis beitragen. Eine Anzahl Klischees wurden von

den Herren E. Kohl in Chemnitz, Hartmann und Braun in Frankfurt a. M. und E. Ruhmer in Berlin zur Verfügung gestellt, wofür ich diesen zu Dank verpflichtet bin.

Herrn Oberingenieur C. Müller, dem technischen Leiter der Cölner Zweigniederlassung der Siemens-Schuckert-Werke, der mir beim Lesen der Korrekturen in freundschaftlichster Weise behülflich war und mir manche wertvolle Anregung gab, spreche ich auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank aus.

Cöln, 1906.

Professor Dr. W. Bermbach.

Berichtigungen.

S. 287 Zeile 11 von oben lies „Zinkchlorid" statt „Zinkoxyd".
S. 340 „ 12 „ „ „ „Ladung" statt „Entladung".
S. 427 „ 15 „ „ „ „1700" statt „1600".

Inhalt.

Erstes Kapitel.

Arbeit und Energie.

Das Fundament, auf dem sich das grosse Gebäude der Physik aufbaut, ist die Mechanik. Neben der Wärmelehre ist es besonders die Elektrophysik, d. h. diejenige Wissenschaft, in der die elektrischen Erscheinungen vom Standpunkte des Physikers aus behandelt werden, die mit der Mechanik in inniger Beziehung steht und deren Studium die Bekanntschaft mit den Elementen der Mechanik voraussetzt. Es liegt daher für denjenigen, der sich mit den Erscheinungen und den Anwendungen des elektrischen Stromes nutzbringend beschäftigen will, die Notwendigkeit vor, sich zunächst mit den wichtigsten Grundbegriffen der Mechanik vertraut zu machen.

1. **Arbeit.** Der Begriff der Arbeit im physikalischen Sinne deckt sich keineswegs mit dem, was man im gewöhnlichen Leben als „Arbeit“ zu bezeichnen pflegt. Wir wollen jedoch nicht sofort zu einer Definition unseres Begriffes schreiten, sondern ihn zunächst an der Hand von Beispielen erläutern.

Indem wir von der Schwerkraft, d. h. der Kraft, mit der die Körper von der Erde angezogen werden, abstrahieren, wollen wir annehmen, dass eine Eisenkugel frei im Raume schwebt. Auf irgend eine Weise — sagen wir durch ein unsichtbares Wesen — werde eine Zeitlang gegen die Kugel ein Druck in horizontaler Richtung ausgeübt. Wenn auch von der Reibung zwischen unserem Körper und der Luft

vorläufig abgesehen wird, so dürfen wir behaupten, dass sich die Kugel in Bewegung setzt, auch wenn der auf sie ausgeübte Druck sehr klein ist; ferner sehen wir ein, dass die Geschwindigkeit der Kugel wächst, so lange ein Druck auf sie ausgeübt wird. Sobald dieser aber aufhört, bewegt sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit auf einer geraden Linie weiter. Beobachten wir nun, dass sich die Geschwindigkeit unserer Kugel ändert, oder dass sie sich plötzlich nicht mehr auf einer Geraden weiter bewegt, so schliessen wir, dass eine Ursache vorhanden sein muss, durch welche die Änderung des Bewegungszustandes bewirkt wurde, und wir nennen diese Ursache Kraft.

Solange gegen die Kugel ein Druck (von unserem fingierten, unsichtbaren Wesen) ausgeübt wurde, ist ihre Geschwindigkeit gewachsen — hat sich ihr Bewegungszustand geändert; also war während dieser Zeit eine Kraft an der Kugel tätig.

Ob die Geschwindigkeit eines gegebenen Körpers (einer gegebenen Masse), wenn eine Kraft auf ihn wirkt, schnell oder langsam zu- bezw. abnimmt, hängt von der Grösse der Kraft ab. Ferner sieht man ohne weiteres ein, dass man eine kleine Eisenkugel (eine kleinere Masse) leichter (durch eine kleinere Kraft) in einer bestimmten Zeit auf eine bestimmte Endgeschwindigkeit bringen kann als eine grosse Eisenkugel, aber schwieriger als eine gerade so grosse (schwerere) Bleikugel. Wir schliessen, dass die Materie das Bestreben hat, in dem Ruhezustande bezw. in dem momentanen Bewegungszustande zu verharren, oder dass sie einer Änderung des durch die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung charakterisierten Zustandes, in dem sie sich gerade befindet, einen passiven Widerstand, über dessen Natur wir nichts Bestimmtes aussagen können, entgegensetzt — Beharrungsvermögen, Trägheit der Materie.

Während der Zeit, in der gegen die Eisenkugel ein Druck ausgeübt wurde, ist an ihr Arbeit geleistet worden. Zu dem Begriffe Arbeit gehören nämlich zwei Dinge, und zwar erstens, dass ein der Bewegung sich entgegenstellender Wider-

stand überwunden wird — dieser ist in unserem Falle die Trägheit —, zweitens, dass, während die Kraft wirkt, Bewegung erfolgt oder ein Weg zurückgelegt wird.

Wenn unsere freischwebende Kugel die Wand eines Zimmers berührt und wir üben einen Druck auf sie aus in der Richtung des auf der Wand senkrecht stehenden Kugeldurchmessers, so erfolgt keine Bewegung; wir leisten (an der Kugel) keine Arbeit im physikalischen Sinne.

Lassen wir jetzt die Annahme fallen, dass keine Reibung stattfindet. Wollen wir jetzt in derselben Zeit die Kugel in denselben Bewegungszustand versetzen, ihr dieselbe Endgeschwindigkeit wie eben erteilen, so müssen wir eine grössere Kraft anwenden; denn ausser der Trägheit ist die Reibung, ein zweiter Widerstand, zu überwinden. Das Mehr an Arbeit wird in Wärme umgesetzt. Hört die Kraft ferner auf zu wirken, so nimmt die Geschwindigkeit der Kugel langsam ab, was eben nicht der Fall war[1]).

Wenn ein Körper auf einer horizontalen, festen Ebene, etwa auf einer Eisfläche liegt, so wird die Schwerkraft durch den Widerstand der Ebene aufgehoben, und wir haben dann den Fall vor uns, dass nur die Trägheit und die Reibung (nicht auch die Erdanziehung als solche) in Betracht kommen. Jedoch besteht jetzt die gesamte Reibung aus zwei Summanden, nämlich der Reibung zwischen dem Körper und der Luft, sowie der Reibung zwischen dem Körper und dem Eise. Letztere hängt von der Beschaffenheit der beiden Oberflächen, von der Grösse der sich berührenden Oberflächenstücke und von dem Gewichte des Körpers ab. Entsprechendes gilt für ein gut ausbalanciertes Rad, das um eine Achse drehbar ist (Schwungrad).

Die Richtung der Schwerkraft, die wir von jetzt an mit in Rechnung setzen wollen, ist die Vertikale. Wollen wir einen Körper, etwa einen Gewichtstein von 1 kg, senkrecht in die Höhe heben, so müssen wir zunächst eine Kraft aufwenden, durch die die Schwerkraft aufgehoben wird; sie muss in unserem Falle gleich der Anziehungskraft der Erde sein.

---

1) Dem Bestreben des Körpers seine Geschwindigkeit beizubehalten, wirkt die Reibung entgegen.

Um die Richtung der Kraft beliebig wählen zu können, bedient man sich einer Rolle (s. Fig. 1). Wird an dem Ende *a* des Fadens mit einer Kraft gleich 1 kg gezogen, so besteht Gleichgewicht. Soll Bewegung erfolgen, so muss man eine Kraft aufwenden, die wegen der Reibung der Rollenachse in ihrem Lager und wegen der Reibung zwischen der Last und der Luft — letztere wollen wir jedoch vernachlässigen — etwas grösser als 1 kg sein muss. Diese Kraft sei (1 + r) kg. Wirkt also an *a* eine Kraft von dieser Grösse, so genügt das Hinzufügen der geringsten Kraft, eine Bewegung herbeizuführen. Wollen wir aber in kürzerer Zeit die Last um ein bestimmtes Stück heben, etwa um 1 Meter, so muss die Zugkraft den Betrag von (1 + r) kg um einen endlichen Betrag übersteigen. Ziehen wir mit einer Kraft von (1 + r + d) kg, so erfolgt eine beschleunigte Aufwärtsbewegung; die Kraft d kg entspricht vollständig dem Drucke, von dem in unserem ersten Beispiele die Rede war, sie bewirkt also die Beschleunigung.

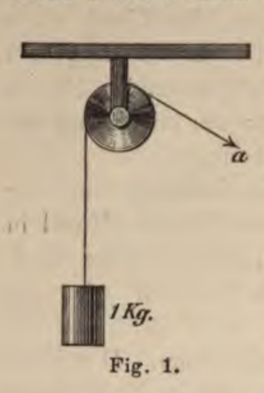


Fig. 1.

Wählte man d = $^1/_{10}$ g, d. h. gleich der Kraft, mit der $^1/_{10}$ g von der Erde angezogen wird, so würden 45 Sekunden verstreichen, ehe unser Kilogramm 1 m hoch gehoben ist; bei d = 1 g ist die betreffende Zeit 14—15 Sekunden.

Ist die Last unter Aufwand der genannten Kraft 1 m hoch gehoben worden, so haben wir eine Arbeit von (1 + r + d) Kilogrammeter oder Meterkilogramm geleistet; denn wenn eine Kraft von 1 kg auf dem Wege 1 m tätig ist, so ist die Arbeit 1 mkg. Von der geleisteten Arbeit wird der Summand r mkg in Wärme umgesetzt. Wie ferner die folgenden Betrachtungen zeigen werden, geht die Arbeit (1 + d) mkg auf die Last über, sie wird in dem Gewichtsteine aufgespeichert.

Man sagt gewöhnlich: ein Meterkilogramm ist die Arbeit, die geleistet wird, wenn man eine Last von 1 kg 1 Meter hoch hebt.

Diese Definition ist streng genommen nur dann richtig, wenn die Bewegung des Kilogramms unendlich langsam erfolgt bezw. wenn das Kilogramm eine unendlich kleine Endgeschwindigkeit hat.

In der Definition des Begriffes Arbeit kommt die Zeit nicht vor. Eine Maschine also, durch die eine gewisse Last, sagen wir 100 kg, in 1 Minute 10 m hoch gehoben wird, leistet die gleiche Arbeit wie eine Maschine, die in 10 Sekunden dieselbe Last bis zur gleichen Höhe befördert. In der Praxis spielt aber die Zeit, in der eine gewisse Arbeit verrichtet wird, eine sehr wichtige Rolle. Wollen wir die beiden Maschinen, von denen die Rede war, bezüglich ihrer Brauchbarkeit miteinander vergleichen, so berechnen wir, welche Arbeit jede in der Zeiteinheit, nämlich in 1 Sekunde, leistet. Bei der ersten Maschine ist die betreffende Arbeit, die man den Effekt nennt, gleich $\frac{10.100}{60}$ mkg und der Effekt der zweiten Maschine beträgt $\frac{10.100}{10}$ mkg.

In der Elektrotechnik benutzt man als Einheit des Effektes 1 Watt $= \frac{1}{9{,}81}$ mkg. Will man also von Meterkilogrammen zu Watt übergehen, so muss man mit 9,81 multiplizieren. (Näheres siehe Kap. 6 und im Anhang, in dem das absolute Maßsystem im Zusammenhang besprochen wird.)

Ein Effekt von 75 mkg wird in der Maschinenlehre als Pferdekraft (PS) bezeichnet. Eine 1pferdige Maschine kann also in jeder Sekunde 75 kg um 1 m heben oder eine entsprechende Arbeit verrichten.

Wenn die Leistung einer Maschine eine Zeitlang die gleiche geblieben ist oder konstant war, so erhält man die während der betreffenden Zeit verrichtete ganze Arbeit, indem man die Leistung (den Effekt) mit der Sekundenzahl multipliziert. Eine Arbeit von 3600.75 mkg nennt man eine Pferdekraftstunde (Pferdekraft während 1 Stunde = 3600 Sekunden).

2. Energie. Unter Energie versteht man die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Wir behandeln zunächst die kinetische Energie und die Energie der Lage (potentielle Energie).

Jeder Körper (jede Masse), der sich im Zustande der Bewegung befindet, oder, wie man kurz sagt, der eine Geschwindigkeit hat, ist imstande, Arbeit zu verrichten. Dies kann man sich, wenn es sich um eine fortschreitende Bewegung, z. B. um den freien Fall, handelt, folgendermaßen klar machen. Ein mit Luft gefüllter Cylinder sei durch einen Stempel luftdicht verschlossen (cf. Fig. 4 Seite 8). Diesen bringen wir in eine solche feste Lage, dass der sich bewegende Körper gegen den Stempel prallt; beim freien Fall also stellen wir den Cylinder einfach auf den Boden. Beim Anprall wird der Stempel in den Cylinder hineingedrückt, und diesem Vorgange entspricht offenbar eine Arbeitsleistung; denn es erfolgt eine Bewegung des Stempels und während der Bewegung ist ein Widerstand, nämlich der Gasdruck (und Reibung), zu überwinden.

Die Energie, die einer Masse vermöge ihrer Geschwindigkeit innewohnt[1]), nennt man kinetische Energie oder lebendige Kraft.

Um zu zeigen, dass auch rotierende Körper (Massen) kinetische Energie besitzen, wählen wir als Beispiel das Schwungrad einer Dampfmaschine. Nachdem dieses eine gewisse Umfangsgeschwindigkeit angenommen hat, möge an der Peripherie ein langes Seil befestigt werden, das über eine Rolle läuft und in einen Brunnen hineinragt; an dem freien Ende des Seiles sei ein Gewicht befestigt. Wird bei der weiteren Rotation des Rades das Seil auf den Umfang des Rades gewickelt, so wird das Gewicht gehoben.

Bei der Rotation haben wir kompliziertere Verhältnisse als bei der fortschreitenden Bewegung, weil die verschiedenen Teile des rotierenden Körpers verschiedene Geschwindigkeiten haben.

Wenn wir das Schwungrad in Gang setzen bezw. ihm eine gewisse Umdrehungsgeschwindigkeit erteilen wollen, so müssen wir eine gewisse Arbeit leisten. Diese wird, wenn wir von der Reibung absehen, in dem Rade aufgespeichert

1) Ausserdem besitzt der Körper noch einen anderen Energieinhalt, nämlich denjenigen, den er als ruhender Körper hat; hierhin gehört z. B. die in ihm aufgespeicherte Wärme.

und kann wiedergewonnen werden, etwa in der eben beschriebenen Weise.

Potentielle Energie. Ist ein Körper, von dem wir annehmen wollen, dass er 1 kg schwer sei, auf irgend eine Weise emporgehoben worden, so hat er Arbeitsfähigkeit (von der Energie, die ihm eventuell infolge seiner Geschwindigkeit innewohnt, wird jetzt abgesehen). Wird also unser von der Erdoberfläche entfernter Körper auf eine Unterlage gestellt (s. Fig. 2), so repräsentiert er einen gewissen Vorrat an Arbeit, über den man jederzeit verfügen kann. Um die potentielle Energie (Energie der Lage) auszunutzen, bedienen wir uns am einfachsten einer Rolle (siehe Figur); sehen wir von der Reibung ab, so schliessen wir, dass die Last *b* nach Beseitigung der Unterlage gehoben wird, falls *b* nur um einen sehr geringen Betrag kleiner ist als *a*. Das emporgehobene Gewicht leistet also, indem es fällt, Arbeit an *b*.

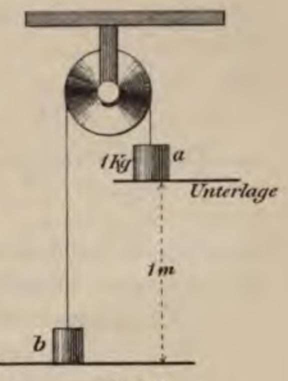


Fig. 2.

Ein interessanter Fall ist der, dass ein Körper senkrecht in die Höhe geworfen wird. In dem Momente, in dem die Aufwärtsbewegung beginnt, hat der Körper nur kinetische Energie (lebendige Kraft); während des Emporsteigens wird diese in Energie der Lage umgesetzt. Hat der Körper den höchsten Punkt erreicht, so ist seine kinetische Energie ganz aufgezehrt, und er besitzt nur potentielle Energie. Während des Falles wächst die kinetische Energie auf Kosten der potentiellen. Wenn keine Reibung zwischen der Luft und dem Körper stattfände, so würde der Körper in dem Momente, in dem er unten ankommt, genau dieselbe Energie (als kinetische) besitzen wie bei Beginn des Emporsteigens.

In dem Beispiele auf Seite 4 wird von der Arbeit $(1 + r)$ mkg der Betrag 1 mkg als potentielle Energie und der Rest als kinetische Energie in dem Gewichtsteine aufgespeichert.

Von den anderen Energieformen sollen in diesem Kapitel nur noch die Wärme und die chemische Spannkraft besprochen werden.

3. Die Wärme als Energieform. Jedes Mal, wenn Reibung stattfindet, haben wir es mit einer Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme zu tun. Dass man auch umgekehrt Wärme in mechanische Arbeit verwandeln kann, lehren uns die Dampfmaschine, die Dampfturbine, der Gasmotor etc., kurz die thermodynamischen Maschinen. Wir wollen jedoch nur zwei ganz einfache Fälle betrachten.

1) Auf einem Eisenblock (*abcd* in Fig. 3) liege eine Last, sie möge 100 kg schwer sein. Wird nun das Eisen erhitzt, so dehnt es sich mit grosser Kraft aus und hebt die Last in die Höhe. Beträgt die Verlängerung jeder vertikalen Kante *ab*, *cd* etc. 1 mm, so ist die von der Wärme geleistete äussere (sichtbare) Arbeit [1]) gleich 100.0,001 mkg = 0,1 mkg. (Der Weg ist, wenn man die Arbeit in Meterkilogrammen haben will, in Metern auszudrücken.)

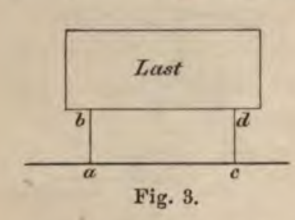


Fig. 3.

2) Verschliesst man einen mit Luft oder einem anderen Gase gefüllten Cylinder durch einen gut passenden Kolben (s. Fig. 4) und erwärmt das Gas, so wird der Kolben nebst einem auf ihm liegenden Gewichte gehoben.

Bei den Gasmotoren wird die Wärme im Cylinder selbst dadurch erzeugt, dass ein Gemenge aus Leuchtgas, Wassergas oder dergl. und atmosphärischer Luft zur Explosion (Entzündung) gebracht wird.

Luft

Fig. 4.

Nach dem *ersten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie* ist, wenn mechanische Arbeit in Wärme umgesetzt wird, das Verhältnis zwischen der ersteren und der erzeugten Wärme ein konstantes, ebenso hat bei dem umgekehrten Prozesse (Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit) das Verhältnis zwischen der umgewandelten Wärme und der daraus entstandenen mechanischen Arbeit immer den-

1) Ausserdem wird der Luftdruck überwunden (s. Seite 11).

selben Wert. Sind also A_1, A_2 ... mechanische Arbeiten, alle ausgedrückt in Meterkilogrammen, und Q_1, Q_2 ... die erzeugten Wärmemengen, alle ausgedrückt in grossen (oder kleinen) Wärmeeinheiten[1], so ist

$$\frac{A_1}{Q_1} = \frac{A_2}{Q_2} \cdots,$$

vorausgesetzt, dass sowohl A_1 als auch A_2 etc. ganz in Wärme verwandelt wird, was übrigens leicht ausführbar ist.

Das definierte konstante Verhältnis nennt man das mechanische Äquivalent der Wärme oder das mechanische Wärmeäquivalent. Drückt man die mechanische Arbeit und die dieser äquivalente Wärmemenge in den angegebenen Einheiten (mkg und Cal.) aus, so hat unser Verhältnis den Wert 426. Wird also z. B. durch Reibung eine Calorie erzeugt, so sind 426 mkg Arbeit in Wärme umgewandelt worden. Findet umgekehrt eine Umsetzung von Wärme in mechanische Arbeit statt, so erhält man für jede umgewandelte Calorie 426 mkg.

1 kg Kohle werde verbrannt; die hierbei frei werdende Wärme betrage 7500 Cal. Man berechne, wie viele Pferdekraftstunden gewonnen werden könnten, wenn es möglich wäre, die ganze entstandene Wärme in mechanische Arbeit zu verwandeln. Anleitung: 7500 Cal. sind äquivalent 7500.426 mkg und 1 Pferdekraftstunde ist gleich 3600.75 mkg.

Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie gehört ebenso wie der erste Hauptsatz zu den Grundprinzipien der Naturforschung. Sein Inhalt ist etwa folgender: Während man mechanische Arbeit voll und ganz in Wärme umsetzen kann, ist eine Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit nur in beschränktem Maße möglich. Die Umwandlung ist nicht etwa wegen der unvermeidlichen Wärmeverluste durch Strahlung und Leitung eine unvollkommene, sondern wegen des Wesens der Wärme bezw. wegen der Eigentümlichkeit des Umwandlungsprozesses selbst.

---

1) Diejenige Wärmemenge, die man 1 kg Wasser zuführen muss, wenn man seine Temperatur um 1° Cels. erhöhen will, nennt man eine grosse Wärmeeinheit (Cal.). Der 1000ste Teil derselben wird als kleine Wärmeeinheit (Grammkalorie, cal.) bezeichnet.

Bei unseren thermodynamischen Maschinen (Dampfmaschine etc.) besteht der Hauptvorgang darin, dass Wärme (aufgespeichert in dem Dampfe) von höherer Temperatur auf eine niedere übergeht. Hat z. B. bei einer Dampfmaschinenanlage der Kessel bezw. der Dampf eine Temperatur von 150°, und herrscht im Kondensator die Temperatur 50°, so fällt die Wärme gleichsam von 150° auf 50°.

Carnot nahm an, dass bei diesem Übergang die Quantität der Wärme unverändert bleibe, ähnlich wie das Wasser bei einem Wasserfall; Clausius zeigte, dass hierbei eine der geleisteten Arbeit äquivalente Wärmemenge verschwindet.

Nehmen wir an, dass in einer gewissen Menge Dampf, der unter Arbeitsleistung durch die Maschine geht und dessen absolute Temperatur[1] T_1 sei, die Wärmemenge Q (in Cal. ausgedrückt) aufgespeichert ist und dass dieser Dampf, wenn er die Maschine verlässt, die absolute Temperatur T_2 hat, so ist die Wärmemenge, die nach der Theorie in Arbeit verwandelt werden kann, gegeben durch den Ausdruck

$$Q \frac{T_1 - T_2}{T_1} \text{ oder } Q \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right).$$

Ist z. B. $T_1 = 273 + 180 = 453$ (entsprechend 180° Cels.) und $T_2 = 273 + 50 = 323$ (entsprechend 50° Cels.), so hat unser Ausdruck den Wert $Q \frac{130}{473} = 0{,}27\ Q$, d. h. es können theoretisch höchstens 27 % der in dem Dampf aufgespeicherten Wärme ausgenutzt werden. Aus Gründen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, ist es jedoch nicht möglich, den theoretischen Wirkungsgrad ganz zu erreichen.

Bei grossen Dampfmaschinen werden 12—15 % der in den Brennstoffen aufgespeicherten Wärme ausgenutzt, bei den Gasmotoren bis zu 30 %.

4. **Chemische Energie.** Schliesslich soll an einigen Beispielen der Begriff chemische Energie erörtert werden[2]. Wenn

1) Nennt man die Temperatur in Celsius-Graden t, so ist die absolute Temperatur $T = 273 + t$. Die Temperatur — 273° Cels. bezeichnet man als den absoluten Nullpunkt (tiefste Temperatur, die überhaupt vorkommen kann).

2) Siehe auch „Elektrochemie“.

zwei Substanzen miteinander reagieren, so wird in vielen Fällen Wärme entwickelt (frei). Bekannte Reaktionen, bei denen Energie (Wärme) frei (gewonnen) wird, sind

$$H_2SO_4 + Z_n = Z_nSO_4 + 2H,$$
$$C + 2O = CO_2, \quad 2H + O = H_2O.$$

Bei manchen Vorgängen wird ausserdem mechanische Arbeit geleistet, vor allem wenn eine Gasentwickelung erfolgt.

Bringen wir Zink und Schwefelsäure in einen Cylinder mit luftdicht schliessendem Stempel, und befindet sich der Cylinder in einem hohen luftleeren Raume, so können wir den Druck, den die Luft ausübt, durch ein Gewicht ersetzen (cf. Fig. 4). Entwickelt sich nun Wasserstoff, so wird der Kolben emporgehoben, d. h. wir gewinnen bei der Reaktion direkt mechanische Arbeit. Übrigens leistet der Wasserstoff auch dann Arbeit, wenn der Prozess in einem offenen Behälter vor sich geht, in dem das Gas dann den Druck der Atmosphäre überwindet.

Wir müssen natürlich annehmen, dass die bei einem Prozesse frei werdende Energie in den reagierenden Substanzen (dem Zink und der Schwefelsäure) schon vor der Reaktion in einer nicht nachweisbaren Form (als potentielle Energie) enthalten war, ähnlich wie die in einer gespannten Feder (infolge ihrer Spannung) angehäufte Energie. Man bezeichnet die bei einer Reaktion frei werdende Energie als die Wärmetönung, ein Begriff, von dem später noch oft die Rede sein wird (s. Elektrochemie).

Die wichtigste Energiequelle bilden die Steinkohlen, die unter Wärmeverbrauch durch einen Umwandlungsprozess aus den Baustoffen der Pflanzen, hauptsächlich also aus Kohlensäure und Wasser, entstanden sind. Sie enthalten Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Wasser (H_2O), ferner Schwefel (in geringer Menge) und mineralische Beimengungen. Die Verbrennung besteht darin, dass sich Kohlenstoff und Wasserstoff mit Sauerstoff der Luft zu Kohlensäure (CO_2) und Wasser verbinden; die mineralischen Bestandteile bleiben als Asche zurück. Die beiden genannten Prozesse verlaufen unter Wärmeentwickelung; wir erhalten die von der Pflanze während ihres Wachstums aufgenommene, für chemische Prozesse verbrauchte Sonnenwärme zurück.

Zweites Kapitel.

Magnetismus.

Bei fast allen elektrischen Apparaten und Maschinen werden Magnete benutzt; die Stromerzeugung in den Dynamomaschinen, die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Arbeit, wie sie in den Elektromotoren erfolgt, beruhen auf der Wechselwirkung zwischen Magnetismus und Elektrizität. Die Besprechung der magnetischen Erscheinungen bildet daher einen wichtigen Gegenstand dieses Buches.

1. **Magnetische Pole, Einteilung der Magnete.** Legt man einen Kompass auf den Tisch, so nimmt die Magnetnadel eine bestimmte Ruhelage ein; die eine Spitze der Nadel zeigt ungefähr nach Norden, die andere also ungefähr nach Süden. Man nennt die Spitzen einer Magnetnadel oder die Endflächen eines Magnetstabes „Pole" und unterscheidet zwischen dem Nordpole und dem Südpole.

Einer alten Vorstellungsweise liegt die Annahme zu Grunde, dass die von einem Magnet ausgeübten Wirkungen ausgehen von zwei sehr feinen (hypothetischen) Massen, den freien Magnetismen, die an den beiden Enden des Magnets angehäuft sind. Die magnetischen Massen (Fluida) bestehen aus ausserordentlich kleinen Teilchen, welche die Eigenschaft haben, dass zwei Teilchen gleicher Art einander abstossen und zwei ungleicher Art einander anziehen. Bei einem gewöhnlichen Magnetstabe befindet sich der freie Magnetismus nur an den Enden, z. T. an der Oberfläche, z. T. im Innern verteilt. Die Wirkung nach aussen ist gerade so, als ob die freien Magnetismen in zwei Punkten in der Nähe der Endflächen, den Polen, konzentriert wären. „Eigentlich gibt es keine punktförmigen Pole in einem Magnete, d. h. es gibt keine zwei Punkte, wo wir uns den positiven (Nord-) und negativen (Süd-) Magnetismus so angehäuft denken können,

dass die magnetische Wirkung auf äussere Punkte dieselbe ist, wie diejenige des über den ganzen Stab verteilten Magnetismus. Es ist dies nur der Fall, wenn ein sehr dünner Stab gleichförmig magnetisiert ist." (Ewing [1]).

Die Pole liegen nicht genau am Ende; bei einem Magnetstabe beträgt die Entfernung der beiden Pole, d. h. der Stellen, an denen die Anziehung des Eisens am stärksten ist, ungefähr $^5/_6$ der Länge des Stabes.

Ausser Magnetnadeln und Stabmagneten benutzt man Hufeisenmagnete (s. Fig. 5). Verbindet man bei den letzteren die beiden Pole durch einen Anker (*A* in Fig. 6) aus weichem Eisen, so erzielt man eine bedeutende Verstärkung der Tragkraft; den Grund werden wir später kennen lernen (s. S. 101).

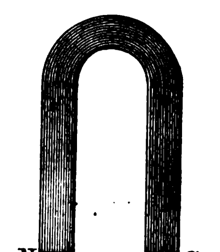


Fig. 5.

Die bedeutende Verstärkung bei Benutzung eines Ankers hatte schon Henry (1831) beobachtet. Er fand, dass ein von ihm benutzter Elektromagnet 317 kg tragen konnte, wenn der Anker beide Pole berührte; lag er aber nur an einem Pole an, so trug er nicht mehr als 2,2—2,7 kg. (C. Heinke, Handbuch der Elektrotechnik I, 2 Seite 416.)

Magnete, die lange Zeit ihren Magnetismus beibehalten, nennt man permanente Magnete. Diese werden aus möglichst hartem Stahl (Wolframstahl, Eisen mit Zusatz von Wolfram) angefertigt. Da es schwierig ist, grössere Stahlmassen stark zu magnetisieren, so setzt man grössere permanente Magnete aus dünneren Lamellen, die einzeln magnetisiert werden, zusammen (s. Fig. 6).

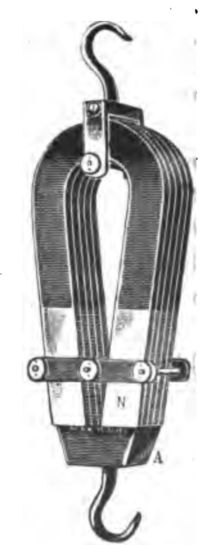


Fig. 6.

Die Elektromagnete werden in einem späteren Abschnitte besprochen werden.

2. Induzierter Magnetismus. Eisen, besonders weiches Eisen, das sich in der Nähe

1) Ewing, Magnetische Induktion.

eines Magnetpols befindet, wird selbst magnetisch. Man kann sich hiervon leicht durch einen einfachen Versuch überzeugen. Schiebt man unter den Nord- oder Südpol eines Magnets ein dünnes Brettchen und nähert dessen Unterseite ein Stück weichen Eisens (*a b* in Fig. 7), so bleibt das Eisen, falls es nicht zu schwer ist, hängen und ein Nagel oder dergl. wird von der unteren Seite angezogen. Der in *a b* entstandene Magnetismus heisst induzierter Magnetismus und die Erscheinung selbst nennt man magnetische Induktion. Ähnlich wie Eisen verhalten sich Nickel, Kobalt, Mangan und noch einige andere Substanzen; jedoch ist der in ihnen induzierte Magnetismus unter sonst gleichen Umständen bedeutend kleiner als in Eisen.

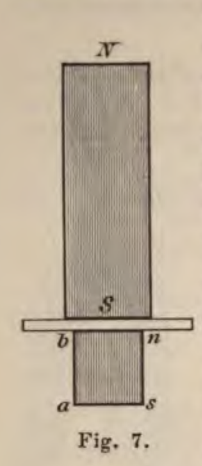


Fig. 7.

Untersuchungen über das magnetische Verhalten der verschiedenen Substanzen wurden bereits von Faraday ausgeführt (1845). Sie „zeitigten die grundlegende Entdeckung, dass alle Stoffe ohne Ausnahme magnetisch werden und nur bei völlig gleicher Magnetisierbarkeit mit der Luft magnetisch indifferent erscheinen“ [1]).

3. **Das Coulombsche Gesetz.** Jeder Magnet, mag er noch so klein sein, hat zwei Pole, enthält Nord- und Südmagnetismus. Obschon also ein freier Nordpol nicht existiert, so können wir uns doch leicht vorstellen, dass ein solcher vorhanden sei. Wir wollen uns jetzt folgende Versuchsanordnung realisiert denken.

Auf einer horizontal liegenden Glasplatte sei eine sehr kleine Eisenkugel festgekittet, und eine zweite ebenfalls sehr kleine Eisenkugel *s* (s. Fig. 8) sei ohne Reibung beweglich. Beide Kugeln mögen die gleiche Menge Magnetismus enthalten, jedoch *n* Nordmagnetismus und *s* Südmagnetismus. Der Abstand der beiden Kugeln (genauer ihrer Mittelpunkte) betrage 1 cm. Unsere beiden gleichnamigen Pole ziehen sich

1) Die meisten sich auf die geschichtliche Entwickelung beziehenden Bemerkungen dieses Buches sind dem eben genannten Werke entnommen.

gegenseitig an; *s* wird sich also nach links bewegen. Um das zu verhindern, denken wir uns an *s* einen gewichtlos gedachten Faden befestigt, der über eine Rolle *r* gelegt ist und durch ein Gewicht gespannt wird. Die Erdanziehung dieses Gewichtes repräsentiert eine der Anziehung der beiden Pole entgegenwirkende Kraft. Der Nordmagnetismus von *n* und der der Menge nach gleiche Südmagnetismus von *s* seien so gross gewählt, dass durch ein Gewicht von $\frac{1}{981}$ Gramm[1]) die Anziehung gerade aufgehoben wird, so dass also *s* bei 1 cm Abstand liegen bleibt. Man bezeichnet bei den gemachten Annahmen *n* und *s* als Einheitspole.

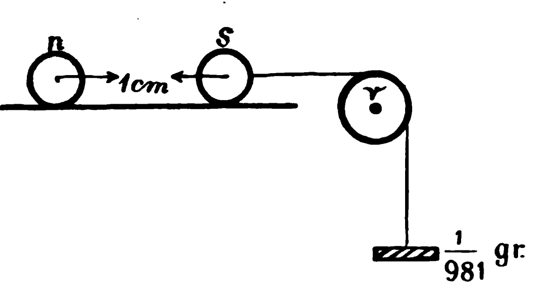


Fig. 8.

Ein freier Pol hat also die Stärke Eins oder ist ein Einheitspol (im C.G.S.-System), wenn er auf einen gleich starken in der Entfernung 1 cm befindlichen ungleichnamigen Pol eine Anziehung ausübt, die gleich 1 Dyne ist (bezw. auf einen gleichnamigen, gleich starken Pol bei 1 cm Abstand eine Abstossung gleich 1 Dyne ausübt).

Denkt man sich bei gleicher Entfernung (1 cm) die Stärke von *n* verdoppelt, so dass also der Nordmagnetismus gleich 2 Einheiten ist, und behält *s* die eben von uns angenommene Stärke, so ist die Anziehung gleich 2 Dynen; verdoppelt man auch die Stärke von *s*, so ist die Kraft, mit der sich die beiden Pole gegenseitig anziehen, gleich 4 Dynen. Allgemein gilt folgendes Gesetz:

Die Kraft, mit der sich zwei Magnetpole anziehen oder abstossen, ist proportional der

1) Die Kraft, mit der dieses Gewicht von der Erde angezogen wird, nennt man 1 Dyne; sie ist die Einheit der Kraft im C.G.S.-System. (Näheres siehe Anhang.)

Stärke des ersten Poles und der Stärke des zweiten Poles, mithin auch proportional dem Produkte der beiden Polstärken.

Es sei wieder $n = +1$ (ein Einheitsnordpol) und $s = -1$ (ein Einheitssüdpol), jedoch möge die Entfernung der beiden Mittelpunkte 2 cm betragen. Die Kraft, mit der sich jetzt die beiden Pole gegenseitig anziehen, ist 4mal kleiner als bei 1 cm Abstand; bei 3 cm Abstand ist sie 9mal kleiner als bei 1 cm etc. Die Kraft also, mit der sich zwei freie (isolierte) Pole gegenseitig anziehen oder abstossen, ist umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der beiden Pole.

Die beiden Gesetze kann man in der Formel vereinigen

$$K = \frac{m \cdot m'}{r^2} \text{ Dynen},$$

wenn m und m' die Polstärken bedeuten, ausgedrückt in der eben definierten Einheit, und r die Entfernung der Pole in Centimetern ist.

Beispiele: 1) Es sei $m = +1000$, $m' = +2000$, $r = 5$ cm.

$$K = \frac{1000 \cdot 2000}{25} \text{ Dynen} = 80\,000 \text{ Dynen (angenähert 80 Gramm).}$$

Dem positiven K entspricht eine Abstossung.

2) Es sei $m = +2000$, $m' = -3000$, $r = 10$ cm.

$$K = -\frac{2000 \cdot 3000}{100} = -60\,000 \text{ Dynen},$$

d. h. die Anziehung beträgt nahezu 60 Gramm.

Unsere Formel bildet den Inhalt des Coulombschen Gesetzes, das man als das Grundgesetz des Magnetismus bezeichnen kann; es wurde von Coulomb mittels der von ihm erfundenen Drehwage, die die Messung ausserordentlich kleiner Kräfte gestattet, in den Jahren 1785—1788 abgeleitet.

4. **Das magnetische Feld.** Der Raum, innerhalb dessen ein Magnetpol nachweisbare (merkliche) Kräfte ausübt oder Wirkungen hervorruft, wird das magnetische Feld genannt. Befindet sich ein positiver Einheitspol an irgend einer Stelle eines magnetischen Feldes, das zu einem kleinen (punktförmigen) Pole von der Stärke m gehört, so ist die auf ihn wirkende (anziehende oder abstossende) Kraft nach dem

Coulombschen Gesetze gleich $\frac{m \cdot 1}{r^2} = \frac{m}{r^2}$ Dynen, wenn r die Entfernung der beiden Pole in Centimetern ist. $\frac{m}{r^2}$ bezeichnet man als die Feldstärke ($\mathfrak{H}$) an dem Orte, wo sich der Einheitspol befindet, also

$$\mathfrak{H} = \frac{m}{r^2}.$$

$\mathfrak{H}$ wird auch als magnetische Kraft in einem Punkte des Feldes oder als Intensität des Feldes bezeichnet.

5. **Magnetische Kraftlinien.** In dem magnetischen Felde eines Magnetstabes mit den Polen *N* und *S* (s. Fig. 9) befinde sich ein freier, punktförmiger [massenloser[1])] Nordpol *n*. Dieser wird von *N* abgestossen und von *S* angezogen. Die beiden auf *n* wirkenden Kräfte kann man sich durch eine einzige Kraft ersetzt denken, die man die Resultierende nennt (Parallelogramm der Kräfte); diese sei der Richtung nach dargestellt durch *nc*. Nachdem *n* auf *nc* um ein sehr kleines Stück vorgerückt ist, denken wir uns eine Ruhepause eingeschaltet; *n* befinde sich jetzt in *d*. Auf *n* wirken in der neuen Lage wieder zwei Kräfte, die sowohl andere Richtungen als auch andere Grössen haben wie die vorigen Kräfte. Konstruiert man daher wieder die Resultierende, so fällt diese nicht mit der vorigen zusammen. Lassen wir also unseren Einheitspol sich weiter bewegen, so schlägt er eine andere Richtung ein u. s. w. Die Bahn von *n* ist also eine krumme Linie, die, wie leicht einzusehen ist, in *S* endigt. Hat sich unser Einheitspol anfänglich dicht bei *N*

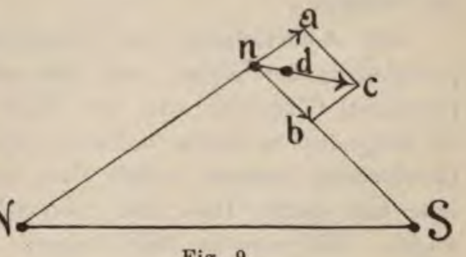


Fig. 9.

1) Dieser Zusatz ist nötig, damit wir von der Erdanziehung absehen können.

befunden, so bewegt er sich auf einer krummen Linie von *N* weg und nach *S* hin.

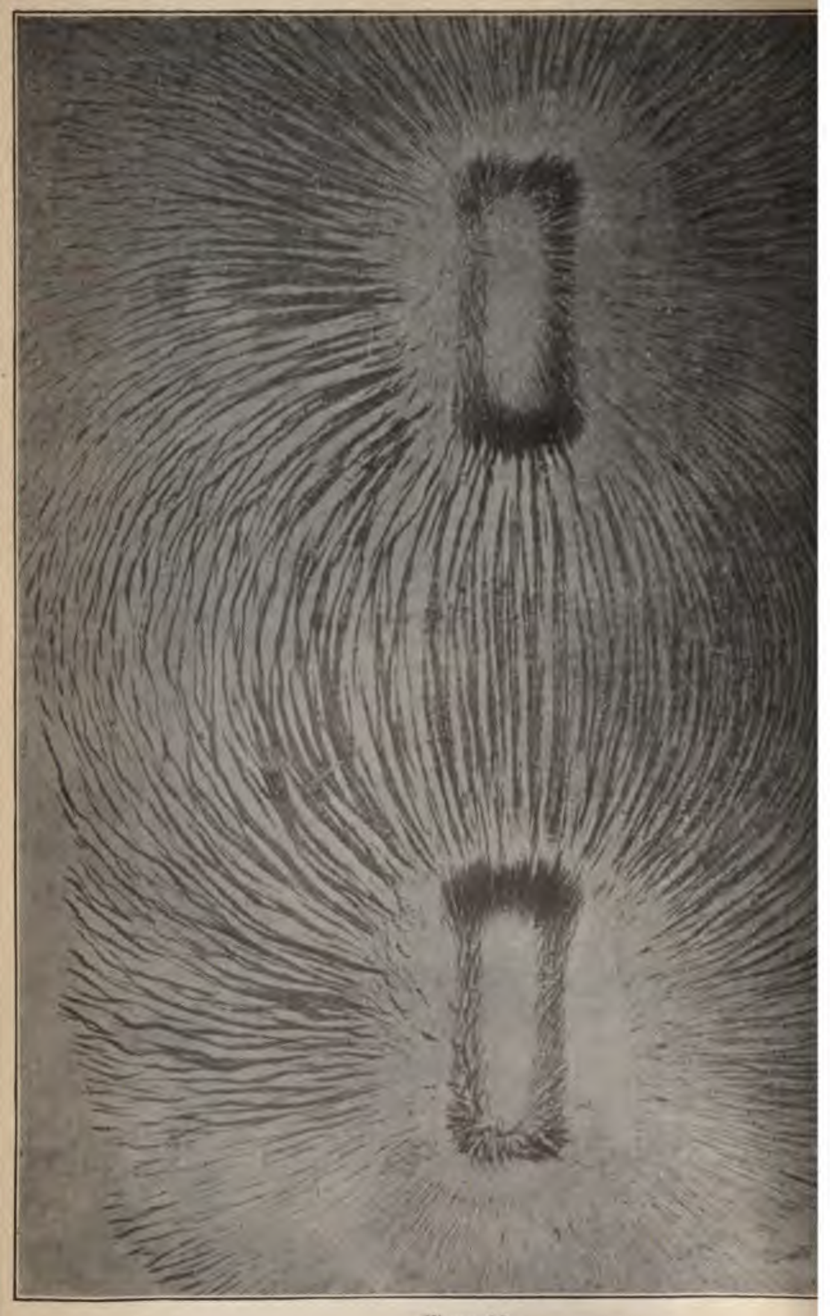
Man nennt die Linien, auf denen sich ein freier (der Erdanziehung entzogener) Pol unter dem Einflusse der magnetischen Kräfte bewegt, Kraftlinien.

Hängt man eine magnetisierte Stricknadel an einem längeren, dünnen Faden so auf, dass das untere Ende, das ein Nordpol sei, nur einige Millimeter von der Tischplatte entfernt ist, und nähert man die Nadel dem Nordpole eines auf dem Tische liegenden Magnetstabes, so beschreibt der bewegliche Nordpol, sobald man ihn loslässt, eine Kraftlinie. Je länger die Nadel und der Faden sind, um so eher kann man das untere Ende der Nadel als einen freien Nordpol ansehen (um so weniger kommt bei der aus der Gleichgewichtslage entfernten Nadel der Einfluss der Schwerkraft zur Geltung).

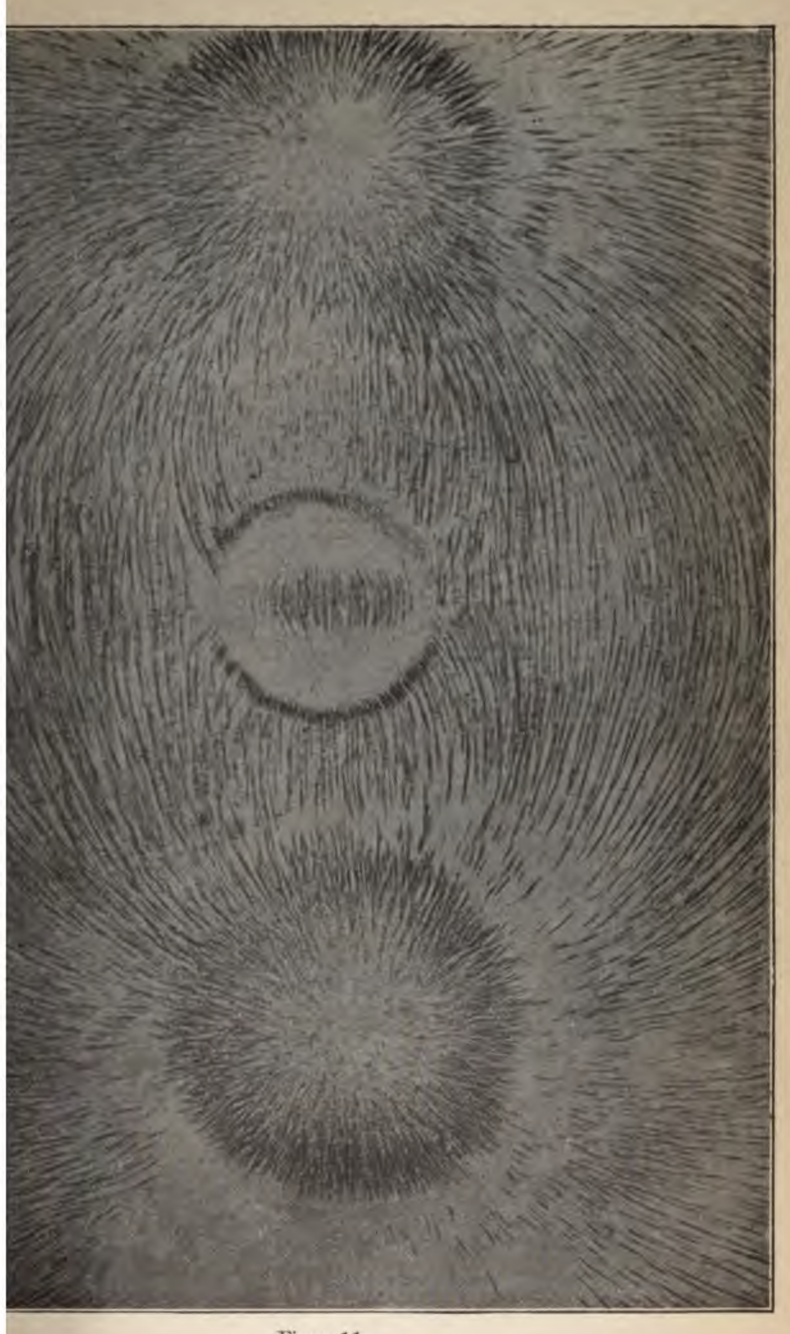
Die Abbildung der Kraftlinien durch Eisenfeilicht geschieht in der Weise, dass man eine gut getrocknete (abgeriebene) Glasplatte oder ein Blatt Kartonpapier, das sich im magnetischen Felde befindet, mit Eisenpulver möglichst gleichmässig bestreut (mittels eines feinmaschigen Siebes) und leise mit einem Glas- oder Holzstabe gegen das Präparat klopft. Will man das Bild fixieren, so benutzt man Kartonpapier und erzeugt mittels einer Blumenspritze, in der sich Gummiarabikumlösung befindet, einen feinen Sprühregen, der langsam auf das Präparat fällt. Statt dessen kann man eine photographische Aufnahme mittels Röntgenstrahlen machen (s. diese). Die Vorlagen für die Figuren 10 und 11 sind nach dieser letzteren Methode entstanden. Fig. 10 zeigt uns die Kraftlinien eines Hufeisenmagnets; seine Schenkel waren vertikal aufwärts gerichtet, auf ihren Endflächen lag das Kartonblatt. Die Fig. 11 bezieht sich auf einen Hufeisenmagnet mit runden Schenkeln; zwischen den Polen befand sich ein Ring aus weichem Eisen. Auf die letztere Figur werden wir später noch einmal zurückkommen.

Erklärung für das Zustandekommen der Linien aus Eisenpulver: Befindet sich in der Nähe eines Magnets *NS* (Fig. 12) ein Eisenstäbchen *ab*, so wird es magnetisch, und zwar wird bei *a* ein Südpol (*s*) und bei *b* ein Nordpol (*n*) induziert. Folglich wird *a* von *N* angezogen und von *S* abgestossen. Ebenso wirken





Figur 10.



Figur 11.



b zwei Kräfte. Ist nun ab sehr klein, z. B. ein Eisenkörnchen, lürfen wir $aN = bN$ und $aS = bS$ setzen, mithin sind die N auf die beiden Pole s und n ausgeübten Kräfte einander ch und ebenso die beiden von uf die kleinen Pole ausgeübten fte. Ferner ist aus Fig. 13 ersehen, dass man die Richgen je eines Kräftepaares als allel ansehen darf. Wie nun Mechanik lehrt, wird unser nkörnchen durch die vier auf Pole n und s wirkenden fte nur gedreht. se Drehung geht sich, wenn man en das Kartonblatt oft, indem dann einen Augenblick Berührung zwin dem Papier und Eisenteilchen und it die Reibung gehoben wird. Befinden sich viele Eisenkörnchen in der Nähe s Magnets (im magnetischen Felde), so gilt für jedes — mit nahme der sehr nahe bei den Polen befindlichen — dasselbe für ab, und die Teilchen ordnen sich zu Kurven.

Fig. 12.

Fig. 13.

Obschon die Kraftlinien nur gedachte Linien (eine hematische Fiktion) sind, so spricht man von ihnen h so, als ob sie ne, unsichtbare, stische Fäden r Röhrchen wären, ch die ein Fluin strömt. Man mt an, dass sie Nordpole und in sen Nähe in den m nach den veriedensten Richtungen hin eindringen, den Südpol aufsuchen durch den Magnet hindurch nach ihrem Ausgangspunkte en (s. Fig. 14). Die Kraftlinien sind in der Längsrichtung

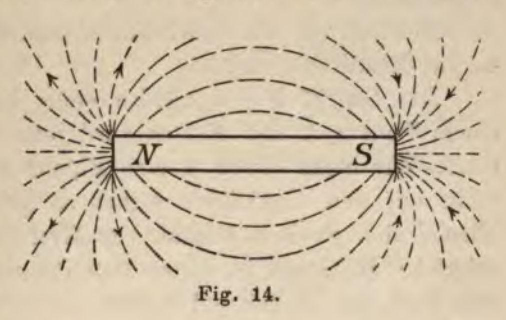


Fig. 14.

gedehnt und in der Querrichtung verdichtet; daher „haben sie das Bestreben sich zu verkürzen und einander abzustossen". (Faraday.)

Da durch jeden Punkt des magnetischen Feldes nach der zuerst gegebenen Erklärung eine Kraftlinie gehen muss, so ist die Anzahl der Kraftlinien eines jeden Poles bezw. Magnets unendlich gross; denn in jedem Punkte des magnetischen Feldes hat die magnetische Kraft eine bestimmte Richtung, und diese wird durch die Kraftlinie bezw. die in dem betreffenden Punkte an die Kraftlinie gezogene Tangente gegeben. Um nun auch die Feldstärke mit Hülfe der Kraftlinientheorie zahlenmässig ausdrücken zu können, macht man über die Anzahl der Kraftlinien, die zu einem Pole gehören, ganz bestimmte Annahmen. Es sei ein freier, punktförmiger Einheitspol gegeben. Um diesen als Mittelpunkt denken wir uns eine Kugel beschrieben, deren Radius 1 cm gross sei. Die Oberfläche dieser Kugel beträgt 4π cm² (Quadratcentimeter). Man nimmt nun an, dass durch jedes Quadratcentimeter der Kugeloberfläche eine Kraftlinie hindurchgeht, dass also ein Einheitspol im Ganzen 4π Kraftlinien aussendet.

Anmerkung. 4π ist keine ganze Zahl, sondern nahezu 12,6; es hat streng genommen keinen Sinn, zu sagen, dass ein Pol $12^6/_{10}$ Kraftlinien aussendet. Trotzdem ist die Annahme eine sehr zweckmässige [1]).

Ein Pol von der Stärke m (C.G.S.-Einheiten) sendet also $4\pi . m$ Kraftlinien aus.

Der Begriff Feldstärke eines beliebigen Poles P in einem Punkte A des Feldes wird jetzt folgendermaßen definiert: Wir legen durch A eine Fläche von 1 cm², die senkrecht auf den Kraftlinien steht; es geht dann durch diese Fläche eine gewisse Anzahl von Kraftlinien hindurch; diese sei gleich $\mathfrak{H}$. Dann ist $\mathfrak{H}$ ein Maß für die Feldstärke. Würde sich in A ein Einheitspol befinden, so würde dieser in der Richtung der durch A gehenden Kraftlinie durch eine Kraft

1) Man vergleiche hierüber die Darlegungen in „Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom" von G. Kapp, 4. Aufl. S. 19.

gleich $\mathfrak{H}$ Dynen vorwärts getrieben (man vergl. die folgende Anmerkung).

Denken wir uns um den (punktförmigen) Pol P eine Kugel mit dem Radius r cm beschrieben, so steht deren Oberfläche überall senkrecht zu den Kraftlinien, und es kommen auf 1 cm^2 $\frac{4\pi m}{4\pi r^2} = \frac{m}{r^2}$ Kraftlinien. $\frac{m}{r^2}$ ist also die eben eingeführte Zahl $\mathfrak{H}$, wenn A die Entfernung r cm von dem Pole P hat. Nach dem Coulombschen Gesetz ist die Kraft, mit der ein auf unserer Kugelfläche liegender Einheitspol angezogen oder abgestossen wird, gleich $\frac{m \cdot 1}{r^2}$ Dynen. Wir sehen also, dass unsere Definitionen in Einklang stehen mit dem Grundgesetze.

Die Anzahl der Kraftlinien, die durch eine Fläche von 1 cm^2, gelegt durch einen Punkt des magnetischen Feldes senkrecht zu den Kraftlinien, gehen, nennt man auch die Kraftliniendichte in dem betreffenden Punkte.

Ein Kraftlinienfeld heisst homogen, wenn in ihm die Kraftlinien parallele Gerade sind, die untereinander gleiche Abstände haben, d. h. also, wenn in ihm die magnetische Kraft in allen Punkten dieselbe Richtung und Grösse hat. Nehmen wir an, dass die Kraftlinien eines solchen Feldes in horizontaler Richtung verlaufen, so schneidet eine senkrecht zu einer Kraftlinie gelegte vertikale Ebene alle Kraftlinien senkrecht, und es kommen auf jedes Quadratcentimeter unserer Ebene, soweit sie dem magnetischen Felde angehört, gleich viele Kraftlinien. $\mathfrak{H}$ ist also für jeden Punkt eines homogenen Kraftlinienfeldes dieselbe Zahl.

Wir werden später sehen, dass man das magnetische Feld zwischen den Polen und dem Anker einer Dynamomaschine als ein homogenes ansehen kann.

„Ferner wird ein nahezu gleichförmiges Feld dadurch erzeugt, dass wir zwei gleiche Magnete mit ebenen Endflächen einander so gegenüberstellen, dass diese parallel sind und der Nordpol des einen Magnets den Südpol des anderen fast berührt. In dem engen Zwischenraume zwischen den gegenüberstehenden Enden herrscht ein starkes magnetisches Feld, durch das die Kraftlinien von einer Fläche zur anderen geradlinig

hindurchlaufen. Das Feld ist, abgesehen von den Rändern, fast gleichförmig." (Ewing, Magnet. Induktion.)

Das stärkste bis jetzt erreichte magnetische Feld (zwischen den Polen eines Elektromagnets) beträgt ca. 40 000 C.G.S.-Einheiten.

6. **Magnetische Permeabilität.** Bringt man in ein homogenes magnetisches Feld von der Stärke $\mathfrak{H}$, in dem also $\mathfrak{H}$ Kraftlinien durch 1 cm^2 des Querschnittes senkrecht hindurchgehen, ein Stück weichen Eisens, so wird das Feld an dem von dem Körper eingenommenen Raume verstärkt; die Kraftlinien werden gleichsam von ihrem ursprünglichen Wege abgelenkt, in den Eisenkörper hineingezogen (s. Fig. 15). Die

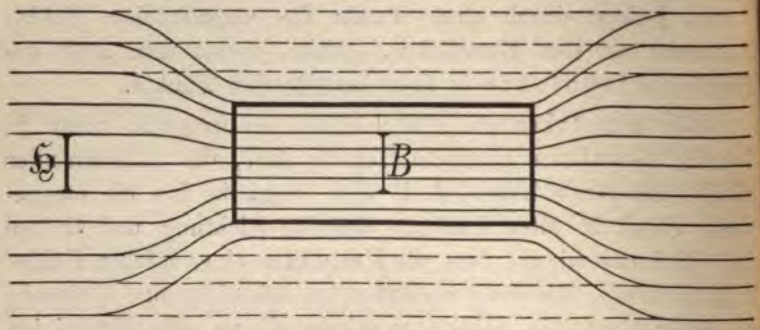


Fig. 15.

Kraftliniendichte in dem betreffenden Raume ist also grösser als vorhin. Die neue Dichte sei B. Das Verhältnis $\frac{B}{\mathfrak{H}}$, das man mit μ bezeichnet, wird die magnetische Permeabilität genannt, B heisst die Induktion.

Induktion = magnetische Permeabilität × ursprüngliche Feldstärke. $B = \mu . \mathfrak{H}$.

Die hier vorkommenden Grössen spielen in der Lehre vom Magnetismus und in der Elektrotechnik eine sehr wichtige Rolle. $\mathfrak{H}$ nennt man auch die magnetisierende Kraft.

Aus Fig. 11 ist die Änderung des magnetischen Feldes ersichtlich, wenn in dasselbe ein Eisenring gebracht wird. Man sieht, dass die Kraftlinien nach dem Ringe hin abgelenkt werden;

in dem von dem Ringe eingeschlossenen Raume ist die Kraftlinienzahl eine nur geringe.

Der Wert von μ hängt zunächst von der Beschaffenheit der Substanz ab, die man in das magnetische Feld bringt. Für Holz, Hartgummi etc. ist μ nur wenig von 1 verschieden, d. h. bringt man einen Körper aus Holz oder dergl. in ein magnetisches Feld, so wird dieses so zu sagen gar nicht verändert. Für verschiedene Eisensorten hat μ verschiedene Werte, aber auch für ein und dieselbe Eisensorte ist μ nicht konstant, sondern in hohem Grade von $\mathfrak{H}$ abhängig. So z. B. ist nach Hopkinson

für $\mathfrak{H} = 1{,}66 \quad \mu = 3000$
„ $\mathfrak{H} = 5 \quad \mu = 2000$
„ $\mathfrak{H} = 200 \quad \mu = 90$

Diese Zahlen beziehen sich auf gut ausgeglühtes Schmiedeeisen.

Umgibt man einen Raum mit einem Schirm oder Schutzmantel von weichem Eisen, so dringen die Kraftlinien eines magnetischen Feldes in das Eisen ein und verlaufen fast ganz in ihm, so dass also der betreffende Raum verhältnismässig frei von Kraftlinien wird, wie er frei von Lichtstrahlen wird, wenn man ihn mit einem für Licht undurchlässigen Schirm umgibt. Von der Schirmwirkung macht man Anwendung bei dem Panzer- oder Marinegalvanometer; um die Magnetnadel dem Einflusse der Eisenmassen des Schiffes zu entziehen, umgibt man das Galvanometer mit einer Hülle aus Eisen.

7. **Ringmagnet.** Wir wollen annehmen, dass ein gleichförmig magnetisierter Eisenstab so zusammengebogen werde, dass ein geschlossener Ring entsteht. Die beiden aneinander liegenden Pole heben sich gegenseitig auf; der magnetische Zustand im Eisen wird aber nicht vernichtet. Wenn wir nämlich den Eisenring in zwei (halbkreisförmige) Stücke zerschneiden, so erhalten wir zwei vollständige Magnete.

Wenn wir also einen Eisenring magnetisieren, so erhalten wir einen pollosen Magneten. Die Kraftlinien bilden geschlossene Kurven, die ganz in dem Ringe verlaufen;

man kann also nicht von einem Ursprunge und einem Ende der Kraftlinien reden.

Ewing unterscheidet zwischen Magnetisierungslinien und Kraftlinien. Um den Unterschied klar zu machen, denken wir uns ein schmales Stück quer aus dem magnetisierten Ringe herausgeschnitten. Auf der einen Seite des Schnittes erhalten wir einen Nord-, auf der anderen Seite einen Südpol. Die beiden Pole sind durch Kraftlinien miteinander verbunden. „Diese Linien können wir uns stetig durch den ganzen Ring innerhalb des Eisens fortgesetzt denken. Jede Linie bildet eine geschlossene Kurve (Kreis): der kürzere Teil liegt in dem Schnitt (dem Luftzwischenraum), während der längere Teil in dem Metall verläuft. Wir wollen die Linien, soweit sie in dem Metall verlaufen, Magnetisierungslinien nennen. Der Name Kraftlinien, der auf die Linien in dem Schnitt anwendbar ist, eignet sich nicht für die Linien im Innern des Metalls, weil diese hier kein Maß für die magnetische Kraft bilden." (l. c. S. 9.)

8. **Molekularmagnete.** Wenn man einen Magnetstab zerbricht, so erhält man zwei kleinere Magnete mit entgegengesetzten Polen von gleicher Stärke; wiederholt man mit jedem Stück das Zerbrechen, so erhält man vier vollständige Magnete etc. Diese Erfahrungstatsache führte zu der Vorstellung, dass jeder Magnet aus sehr kleinen Magneten, den Molekularmagneten, zusammengesetzt sei.

Man kann nun entweder annehmen, dass bei gewöhnlichem Eisen die Moleküle unmagnetisch sind und erst bei der Magnetisierung eine Scheidung des nord- und südmagnetischen Fluidums erfolge, oder dass die Moleküle von vornherein vollständige Magnete sind und dass diese bei der Magnetisierung gedreht werden (Scheidungshypothese — Coulomb, Poisson, Gauss; Drehungshypothese — Kirwan, Ohm, W. Weber). Der letzteren Hypothese wollen wir uns anschliessen, da sie eine einfache Erklärung der zu besprechenden Erscheinungen gestattet.

Bei gewöhnlichem Eisen liegen die Molekularmagnete ohne Ordnung neben einander, so dass eine Wirkung nach

aussen hin nicht zustande kommt. Beim Magnetisieren werden die Moleküle so gedreht und gerichtet, dass die Nordpole nach der einen und die Südpole nach der anderen Richtung zeigen.

Man benutzt, um dies zu zeigen, ein Modell, bestehend aus zahlreichen kleinen Magneten, die sich um vertikale Achsen drehen können. Nach aussen hin wirken nur die an den Endflächen befindlichen Nord- bezw. Südmagnetismen (s. Fig. 16).

Bricht man den Magnetstab durch, so muss die Bruchfläche natürlich zwischen den Molekülen hindurchgehen, da ja ein Molekül auf mechanischem Wege nicht geteilt werden kann, und es entstehen, wie man leicht einsieht, zwei vollständige Magnete. (Unsere Figur bezieht sich auf den Fall, dass das Eisen vollständig magnetisiert ist.)

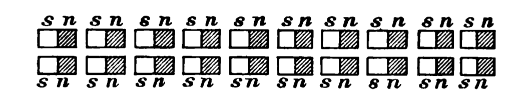


Fig. 16.

Die Drehung der Molekularmagnete kann in bekannter Weise durch Streichen mit einem Magneten oder dadurch erreicht werden, dass man den Eisenstab in eine Spule legt, die von einem elektrischen Strome durchflossen wird (näheres siehe Kap. 7). Nach unserer Hypothese kann man ein gegebenes Stück Eisen nur bis zu einer gewissen Grenze magnetisieren, die erreicht ist, wenn alle Molekularmagnete die in der Fig. 16 angedeutete Lage eingenommen haben. Dieser Schluss wird durch die Erfahrung bestätigt (magnetische Sättigung).

Um das Verhalten des Eisens bei der Magnetisierung mit Hülfe der Drehhypothese erklären zu können, müssen wir noch folgende Annahmen machen: 1) Der Drehung der Moleküle wirke eine elastische Kraft entgegen, welche die Moleküle, wenn die magnetisierende Kraft aufhört zu wirken, in die ursprüngliche Lage, die wir als Gleichgewichtslage bezeichnen wollen, zurückzudrehen bestrebt ist; 2) soll bei der Drehung der Molekularmagnete Reibung zu überwinden sein; 3) die beiden der Drehung entgegenwirkenden Kräfte sind bei den verschiedenen Materialien ungleich gross.

Ehe gezeigt wird, dass eine ganze Reihe von Erfahrungs-

tatsachen durch unsere Hülfsvorstellung erklärt werden kann, soll ein (dem Handbuch der Elektrotechnik entnommenes) mechanisches Modell besprochen werden. *M* in Fig. 17 sei ein Molekül des Eisens, von dem wir also annehmen, dass es die Gestalt einer Kugel hat. Es werde durch zwei Kautschukfäden *F* in seiner natürlichen Achsenlage *O O* festgehalten. Die Reibung, die *M* bei einer Drehung zu überwinden hat, werde durch zwei Bremsbacken *B* zur Anschauung gebracht. Der magnetisierenden Kraft entspreche die eine Drehung bewirkende Kraft *D*. Dreht sich der Molekularmagnet um die Achse *O O*, so werden die Fäden *F* gespannt (*F'*), und die elastische Kraft sucht das Molekül in die ursprüngliche Lage zurückzuführen.

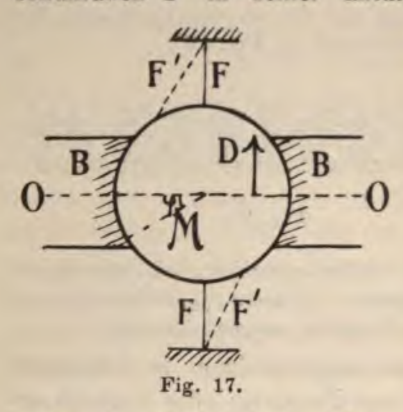


Fig. 17.

Zunächst sieht man ein, dass nicht durch jede magnetisierende Kraft eine solche Drehung der Molekularmagnete bewirkt wird, dass bei allen die nordmagnetische Hälfte nach derselben Seite gerichtet ist. Dies wird erst der Fall sein, wenn die drehende (magnetisierende) Kraft eine gewisse, vor allem von der Beschaffenheit des Eisens abhängige Grösse erreicht hat (magnetische Sättigung, μ ist bei derselben magnetisierenden Kraft abhängig von der Beschaffenheit des Eisens). Jeder magnetisierenden Kraft entspricht eine gewisse Drehung (Induktion), jedoch wird der erzeugte Magnetismus keineswegs proportional der magnetisierenden Kraft (*D*) sein, da die Spannung der Fäden *F* nicht proportional der Drehung wächst. Es erklärt sich so, dass μ nicht konstant ist, sondern mit zunehmendem $\mathfrak{H}$ abnimmt.

Das Verhältnis des Drehungswinkels φ, der offenbar ein Maß für die Induktion (B) ist und der äusseren eine Drehung hervorrufenden Kraft (die früher mit $\mathfrak{H}$ bezeichnete Grösse) kann als

die magnetische Drehfähigkeit des Moleküls angesehen werden; es hat offenbar dieselbe Bedeutung wie die früher definierte magnetische Durchlässigkeit oder Permeabilität.

Ferner folgt aus unseren hypothetischen Annahmen, dass die Molekularmagnete, sobald die magnetisierende Kraft aufhört zu wirken, eine Drehung ausführen, durch die sie der Gleichgewichtslage genähert werden, indem nämlich die Reibung eine vollständige Rückkehr in die ursprüngliche Lage verhindert. Weiches Eisen, das man aus dem Felde eines permanenten Magnets entfernt, wird also nicht seinen ganzen Magnetismus verlieren, sondern einen Teil zurückhalten — remanenter Magnetismus. Wie gross die Remanenz ist, hängt von der magnetisierenden Kraft (der Grösse des Drehungswinkels der Achse OO) und von der Grösse der Reibung ab, die wir als Koerzitivkraft bezeichnen wollen. Die verschiedenen Eisensorten unterscheiden sich also hauptsächlich durch die Grösse der Koerzitivkraft. Um permanente Magnete herzustellen, wird man also Eisen von möglichst grosser Koerzitivkraft verwenden.

Da durch eine mechanische Erschütterung eine momentane Verringerung der Reibung (eine Verkleinerung des Druckes, den die Bremsbacken ausüben) bewirkt wird, so wird eine solche eine weitere Annäherung des Moleküls an die Gleichgewichtslage, d. h. eine Verringerung des remanenten Magnetismus, zur Folge haben. Erwärmung eines Magnets ist gleichbedeutend mit einer längere Zeit dauernden Erschütterung.

Ist bei einem Magnetstabe der magnetische Zustand von einem Ende des Stabes bis zum andern überall derselbe — sind also alle Moleküle um denselben Winkel gedreht — so nennt man den Stab gleichförmig magnetisiert. Könnte man einen solchen Stab in Teile quer durchschneiden, ohne den magnetischen Zustand zu stören (durch die Erschütterung), so wäre jedes dieser Stücke ein Magnet von derselben Polstärke wie der ganze Magnetstab.

Ein anderer Schluss, den wir, das Modell als gedankliches Zwischenglied benutzend, ziehen, ist der, dass für die Magnetisierung des Eisens Arbeit aufgewendet werden muss,

da ja während der Drehung der Molekularmagnete Widerstände zu überwinden sind.

Magnetisierungsarbeit[1]). Es ergibt sich ohne weiteres, dass diese Arbeit bei einer bestimmten Eisensorte von der Stärke des erreichten Magnetismus und von der Anzahl der Eisenmoleküle, d. h. von dem Volumen, abhängig sein wird. Man bezieht die Magnetisierungsarbeit bei Angaben über ihre Grösse auf 1 cm^3, vielfach auch auf 1 kg. Da bei der Reibung Wärme erzeugt wird, so wird auch der Magnetisierungsarbeit eine gewisse im Eisen erzeugte Wärmemenge entsprechen.

Endlich können wir leicht die etwas kompliziertere Erscheinung der sogenannten Hysterese (Hysteresis) erklären. Ein Eisenstab möge sich in einer Spule befinden, durch die ein Strom fliesst; die Stärke des Stromes sei bei Beginn des Versuches gleich Null, werde bis zu einem gewissen Betrage allmählich (kontinuierlich) gesteigert und dann wieder verringert. Jeder Stromstärke entspricht eine gewisse magnetisierende Kraft. Die Versuche zeigen nun, dass die Stärke der Magnetisierung (der Polstärke des Elektromagnets) in einem bestimmten Momente nicht den der Stromstärke entsprechenden Wert hat. Bei abnehmender magnetisierender Kraft (Stromstärke) hat die Induktion (der Winkel φ) einen grösseren Wert als bei zunehmender magnetisierender Kraft. Zweimal hat ja bei unseren Annahmen der Strom denselben Wert J, einmal während des Anwachsens, etwa zur Zeit t_1, ein zweites Mal während der Abnahme (Zeit t_2). Zur Zeit t_1 ist also die Polstärke kleiner als zur Zeit t_2. Hat der Strom den Wert Null wieder erreicht, so hat die Induktion noch einen gewissen von der Beschaffenheit des Materials abhängigen Wert (Remanenz). Die Induktion hinkt, allgemein ausgedrückt, hinter der magnetisierenden Kraft her[2]). Dieses Nachhinken — von Warburg zuerst nachgewiesen — ist

1) Diese Arbeit besteht nach unserer Auffassung aus zwei Summanden, dem ersten entspricht die Reibung, dem zweiten die Feldenergie.

2) Hysteresis ist abgeleitet von ὑστερέω = zurückbleiben.

nun nach der Drehhypothese eine Folge des Umstandes, dass die Drehung der Molekularmagnete Zeit in Anspruch nimmt. Die früher erwähnten Verluste, welche der Reibungsarbeit entsprechen, bezeichnet man auch als Verluste infolge der Hysteresis oder kurz als Hysteresisverluste [1]). Bei einmaligem Magnetisieren des Eisens ist die diesem Verluste entsprechende Wärmemenge so gering, dass eine nachweisbare Temperaturerhöhung nicht erfolgt. Leitet man aber durch die oben erwähnte Spule Wechselströme längere Zeit hindurch, so drehen sich die Molekularmagnete sehr oft und zwar abwechselnd nach der einen und nach der anderen Richtung; die erzeugten Wärmemengen addieren sich, und es kann zu einer starken Erhitzung des Eisenstabes kommen (siehe auch Foucaultsche Ströme).

Faradays Kraftlinien. Während die älteren Hülfsvorstellungen annahmen, dass die Kraft, die ein Magnetpol auf einen anderen entfernten ausübt, ohne Mitwirkung des zwischen den beiden Polen liegenden Mediums (z. B. der Luft) stattfände (unvermittelte Fernwirkung), schrieb Faraday der Materie des Zwischenraumes eine mitwirkende (ja sogar die Haupt-) Rolle zu. Dasselbe gilt von den elektrischen Vorgängen. Eine grössere Abhandlung „Über die physischen Magnetkraftlinien" erschien im Jahre 1852. Aus dieser seien einige Sätze citiert. „Inbezug auf die Gravitation [2]) kennen wir keinen Vorgang, der uns zu der Vorstellung einer für sich bestehenden physischen Kraftlinie brächte und soviel wir bis jetzt wissen, ist die Gravitationslinie nur eine gedachte Linie, welche die Richtung darstellt, in der die Kraft wirkt.

Nehmen wir eine andere Kraftwirkung der Sonne, welche diese gegen die Erde ausübt, nämlich ihre leuchtende oder erwärmende Kraft. Strahlen (das sind Kraftlinien) durchsetzen den dazwischen liegenden Raum; diese Linien können wir jedoch durch verschiedene in ihre Bahn gestellte Media beeinflussen (Reflexion, Brechung etc.). Sie stehen in Beziehung zur Zeit und brauchen 8 Minuten, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, so dass sie

1) Aus unserer Hülfsvorstellung folgt ohne weiteres, dass der Hysteresisverlust proportional der Koerzitivkraft und proportional der Induktion, d. h. dem Winkel φ ist.

2) Speziell ist die Anziehung gemeint, die die Sonne auf die Erde ausübt.

für sich, unabhängig von ihrer Quelle und ihrem Heim bestehen können und eine deutlich bestimmte physische Existenz haben.

In diesen beiden Fällen, der Gravitation und der Strahlung (Licht, Wärme) ist der Unterschied zwischen einer abstrakten und einer physischen Kraftlinie unmittelbar einleuchtend.“ (Erstere ist nur eine gedachte Linie, auf der letzteren spielt sich ein physikalischer Vorgang ab, sie verhält sich wie ein Strom, der in einer bestimmten Richtung wirkt.)

Nachdem Faraday die Eigentümlichkeiten der (elektrischen und) magnetischen Kräfte charakterisiert hat, fährt er fort:

„Alle diese Tatsachen und viele andere weisen auf die Existenz physischer Kraftlinien sowohl ausserhalb als innerhalb des Magnets hin. Sie bilden sowohl krumme als gerade Linien; denn bei einem geraden Magnetstab müssen die Polaritäten aussen offenbar durch krumme Kraftlinien zu einander in Beziehung stehen. Krumme Kraftlinien aber können, glaube ich, nur solche sein, die physische Existenz besitzen.“ .....

„Was das für ein Zustand ist (in dem sich die Umgebung eines Magnets befindet), lässt sich vorläufig nicht sagen. Er kann wie ein Lichtstrahl vom Äther bedingt sein, und es ist ja auch ein Zusammenhang zwischen Licht und Magnetismus dargetan worden [1]). Es kann ein Spannungszustand oder ein Schwingungszustand oder am Ende ein dem elektrischen Strome analoger Zustand sein, zu dem die magnetischen Kräfte in inniger Beziehung stehen.“

Die jetzt herrschende Ansicht ist die, dass durch den Lichtäther, der den ganzen Weltraum und die Zwischenräume zwischen den Molekülen der Körper ausfüllt, die magnetischen (und elektrischen) Kräfte übertragen werden. „Nehmt aus der Welt den lichttragenden Äther, sagt H. Hertz [2]), und die (elektrischen und) magnetischen Kräfte können nicht mehr den Raum überschreiten.“

Maxwell knüpfte an die Ideen Faradays an. Auf die Leistungen dieses genialen Forschers soll jedoch erst in einem späteren Abschnitte näher eingegangen werden.

---

1) Hier ist die von Faraday zuerst beobachtete Drehung der Polarisationsebene durch ein magnetisches Feld gemeint.

2) Über die Beziehung zwischen Licht und Elektrizität. Vortrag. 12. Aufl. Stuttgart, A. Kröner.

Drittes Kapitel.

Grundbegriffe der Elektrizitätslehre.

1. Hülfsvorstellung über das Wesen der Elektrizität[1]. Eine Hülfsvorstellung, die bei dem Studium der elektrischen Erscheinungen sehr gute Dienste leistet, ist die, dass die Elektrizität ein ausserordentlich feiner Stoff (Fluidum, Agens) sei, der eben wegen seiner Feinheit in das Innere der Körper eindringen und sich in ihnen mit grosser Geschwindigkeit vorwärts bewegen (fliessen) kann (Symmer, Coulomb, W. Weber). Die Fluidumstheorie nimmt die Elektrizität als etwas von vornherein vorhandenes (primär gegebenes) an und unterscheidet zwischen einem positiven und negativen Elektrizitätsstoff. Wie man von der Materie annimmt, dass sie aus kleinsten Teilchen (Atomen) zusammengesetzt sei, so soll sowohl die positive als auch negative Elektrizität aus kleinsten Teilchen, den Elektrizitätsatomen, bestehen. Diese sind im Vergleich zu den materiellen Atomen ausserordentlich klein.

Wir müssen aus unseren Annahmen den Schluss ziehen, dass man Elektrizität weder erzeugen noch vernichten kann; was wir mit dem Ausdruck „Elektrisieren“ bezeichnen, ist nur eine andere Gruppierung, eine andere Verteilung der vorhandenen Elektrizität. Die gesammte Menge der positiven und negativen Elektrizität ist vor dem Elektrisieren gerade so gross wie nach demselben. Man nennt einen Körper neutral elektrisch, wenn sich in ihm die gleiche Menge posi-

1) Der Name Elektrizität ist abgeleitet vom griechischen ἤλεκτρον (Bernstein). Dieser erlangt durch Reiben die Eigenschaft, leichte Körper anzuziehen.

2) Eine grosse, ausführliche Abhandlung über die älteren und neueren Hülfsvorstellungen findet man in dem Werke: Die Elektrophysik und die Theorie des Magnetismus von C. Heinke und H. Ebert (Handbuch der Elektrotechnik Bd. I).

tiver Elektrizität befindet wie negativer; dieses gilt auch für die Teile unseres Körpers bis herab zu den Molekülen.

Vergleichen wir die positive Elektrizität mit einer Säure, die negative mit einer Basis. Giessen wir zu einer Säure ein äquivalentes Quantum einer Basis, so hat die Flüssigkeit weder den Charakter der Säure noch den der Basis. Ähnlich hat ein neutral elektrischer Körper weder die Eigenschaften (bezw. übt die Wirkungen aus) eines positiv geladenen noch diejenigen eines negativ elektrischen.

Entzieht man einem neutralen Körper positive (oder negative) Elektrizität — Elektrisieren durch Reibung — oder gibt er sie von selbst ab, wie es z. B. bei dem Zink der galvanischen Elemente geschieht, so wird er negativ (bezw. positiv) elektrisch, d. h. das Entziehen, ebenso die Abgabe von positiver Elektrizität ist gleichbedeutend mit dem Entwickeln von negativer Elektrizität.

Die kleinste bis jetzt isolierte Elektrizitätsmenge finden wir bei den Kathodenstrahlen (s. Gasentladungen), man bezeichnet sie als Elementarquantum der Elektrizität, und man ist, wenigstens einstweilen, berechtigt anzunehmen, dass das Elementarquantum aus einem Elektrizitätsatom (Elektron) besteht.

Zur Rechtfertigung des hier eingenommenen Standpunktes sei folgende Stelle aus einer Arbeit Poincarés (Physikal. Zeitschr. 1900, 167 ff.) citiert: „Noch vor 15 Jahren gab es keinen lächerlicheren, mehr überwundenen Standpunkt, als die Fluida Coulombs; und siehe da, sie erscheinen heute unter dem Namen Elektron wieder. Wodurch unterscheiden sich diese elektrisierten Moleküle (Atome) von bleibender Form von den elektrischen Molekülen (Elektrizitätsteilchen) Coulombs? Freilich bei den Elektrons wird die Elektrizität von etwas Materie getragen; aber von wie wenig; mit anderen Worten, sie haben eine Masse [1]); auch Coulomb verweigerte seinen Flüssigkeiten (Fluiden) die Masse nicht oder, wenn er es tat, nur mit Vorbehalt."

2. **Die Einheit der Elektrizitätsmenge.** Die Definition dieses Begriffes ist derjenigen, die für den Einheitspol gilt,

---

1) Es sei schon hier bemerkt, dass nach der Ansicht vieler Forscher diese Masse nur eine scheinbare ist, dass also das Elektron nur aus einem Elektrizitätsatom besteht.

analog gebildet. Bekanntlich kann man experimentell nachweisen, dass gleichnamige Elektrizitäten sich gegenseitig abstossen und ungleichnamige einander anziehen. Für die elektrostatische Anziehung und Abstossung, also für die Kräfte, die ruhende Elektrizitäten aufeinander ausüben, gilt nun, wie Coulomb nachgewiesen hat, dasselbe Gesetz wie für die magnetischen Kräfte. Denken wir uns also, zwei Kugeln, die so klein sein mögen, dass wir sie als Punkte ansehen können, seien gleichnamig und gleich stark geladen; ihr Abstand betrage 1 cm. Die Elektrizitätsmengen seien so gross gewählt, dass die Abstossung, die sie aufeinander ausüben, gleich ist 1 Dyne, also durch die Zugkraft von etwa 1 Milligramm gerade aufgehoben wird; wir sagen dann, dass sich auf jeder der beiden Kugeln eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge befindet.

Auf theoretischem bezw. experimentellem Wege wurde von verschiedenen Forschern das Verhältnis zwischen der eben definierten Einheit und dem Elementarquantum der Elektrizität (Elektron) ermittelt. Im Mittel ergab sich, dass das Elementarquantum gleich 4,2 dividiert durch 10 000 Millionen ($4{,}2 . 10^{-10}$) elektrostatischen Einheiten ist [1]), mit anderen Worten: befindet sich auf einem Körper die Elektrizitätsmenge Eins, so enthält er angenähert $24 . 10^8$ freie Elementarquanten (Elektrizitätsatome).

Die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ist, besonders wenn es sich um fliessende Elektrizität handelt, unbequem klein. Man hat daher noch eine grössere Einheit festgelegt, das Coulomb (s. absolutes Maßsystem), und zwar ist

1 Coulomb = 3000 Millionen elektrostat. Einheiten = $3 . 10^9$ el. Einh.

Die Elektrizitätsmenge, die in 1 Minute durch eine 16kerzige Glühlampe fliesst, beträgt etwa 1800 Coulomb. Aus diesem Beispiele ersieht man, zu welch' enormen Zahlen man gelangen würde, wenn man sich immer der elektrostatischen Einheit bediente. Wenn es sich dagegen um ruhende

1) Nach Richarz $1{,}29 . 10^{-10}$, nach Thomson $6{,}5 . 10^{-10}$, nach Planck $4{,}69 . 10^{-10}$.

Elektrizität handelt, ist 1 Coulomb eine ausserordentlich grosse Menge. Damit wir hiervon eine Vorstellung gewinnen, wollen wir annehmen, dass zwei Kugeln, deren Mittelpunkte einen Abstand von 100 cm haben, mit je 1 Coulomb positiver Elektrizität geladen seien. Die Abstossung erfolgt so, als ob die Elektrizität einer jeden Kugel ganz im Mittelpunkte konzentriert wäre; ihre Grösse beträgt also nach dem Coulombschen Gesetz

$$\frac{30 \cdot 10^8 \cdot 30 \cdot 10^8}{100^2} \text{ Dynen} = 900 \cdot 10^{12} \text{ Dynen.}$$

Da die Kraft, mit der 1 kg von der Erde angezogen wird (also die Zugkraft eines an einem Faden aufgehängten Kilogramms), nahezu 10^6 Dynen beträgt, so ist die Abstossung ungefähr gleich 900 Millionen Kilogramm.

Eine einplattige Influenzmaschine liefert, wenn sie 24 Stunden im Betriebe ist, noch nicht ganz 1 Coulomb positiver und negativer Elektrizität.

3. **Das Potential.** Der Begriff des Potentials, mit dem wir uns jetzt beschäftigen wollen, spielt in der Elektrizitäts-

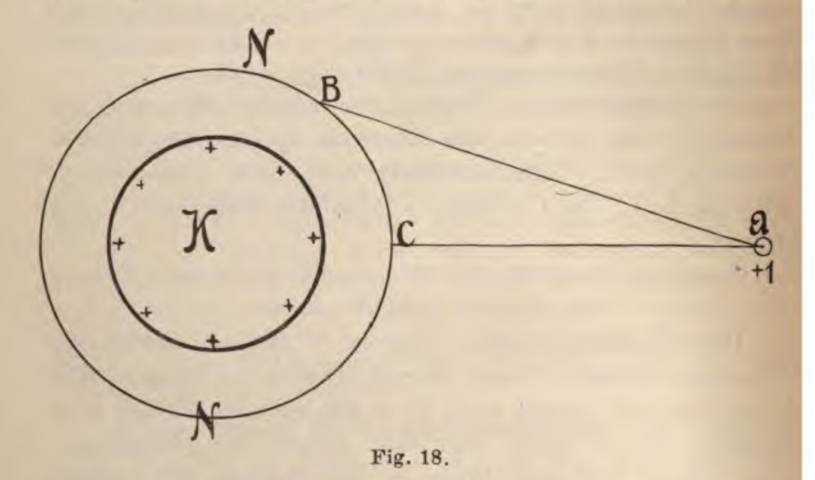


Fig. 18.

lehre eine ausserordentlich wichtige Rolle. Es sei K in Fig. 18 ein beliebig geformter Körper, der mit positiver oder negativer Elektrizität geladen sei. (Bei den folgenden Betrachtungen

nehmen wir an, dass *K* eine positiv geladene Kugel sei; enthält *K* negative Elektrizität, so hat man im Folgenden nur einzelne Ausdrücke zu ändern.) *a* sei eine kleine Kugel, auf der sich eine elektrostatische Einheit positiver Elektrizität befinde. Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass *a* von der Erde nicht angezogen wird, also frei im Raume schwebt. Diese Annahme ist insofern gestattet, als die Materie bei unseren Betrachtungen zunächst keine Rolle spielt, sie dient nur als Träger der Elektrizität. Die Entfernung zwischen *K* und *a* sei so gross gewählt, dass die Abstossung, welche die beiden Elektrizitätsmengen aufeinander ausüben, als verschwindend klein angesehen werden kann. Die Kugel *a* bezw. die Elektrizitätsmenge Eins werde jetzt *K* genähert; hierbei müssen wir Arbeit leisten, denn es erfolgt Bewegung unter Überwindung eines Widerstandes, nämlich der Abstossung zwischen *K* und *a*. Je kleiner der Abstand zwischen *K* und *a* wird, um so grösser wird nach dem Coulombschen Gesetz die Abstossung, um so grösser wird also auch die Arbeit, die wir verrichten müssen, wenn wir *a* um 1 cm verschieben wollen. Berührt *a* den Körper *K*, so dürfen wir sagen, dass wir die Elektrizitätsmenge Eins aus sehr grosser Entfernung auf *K* geschafft haben. Die diesem Transporte entsprechende Arbeit nennt man das Potential der auf *K* befindlichen Elektrizität oder kurz das Potential von *K*.

Wenn wir die Einheit der Elektrizität aus sehr grosser Entfernung nicht ganz bis an den Körper *K* transportieren, sondern vorher, etwa in einem Punkte *C* der Umgebung von *K*, Halt machen, so leisten wir ebenfalls eine gewisse Arbeit. Diese Arbeit wird das Potential der auf *K* befindlichen Elektrizität auf *C* oder im Punkte *C* genannt. Wie man mathematisch beweisen kann, ist die Arbeit, die man leisten muss, um *a* aus sehr grosser Entfernung (der Unendlichkeit) nach dem Punkte *C* hin zu schaffen, ganz unabhängig von dem Wege, der gewählt wird; bewegt sich also *a* auf einer Kurve, etwa auf einer Wellenlinie, so ist die Arbeit gerade so gross, wie wenn der Weg eine gerade Linie ist.

Analogie: Die Arbeit, die man verrichten muss, wenn man ein Gewicht um ein bestimmtes Stück von der Erdoberfläche entfernen will, ist, wenn man von der Reibung absieht, von dem Wege unabhängig. Transport einer Last auf einer schiefen Ebene.

Man sieht nun leicht ein, dass es in der Umgebung von *K* unzählig viele Punkte geben muss, denen dasselbe Potential zukommt. Die Gesamtheit dieser Punkte bildet eine den Körper *K* einhüllende Fläche, eine sogenannte Niveaufläche. Auf einer Niveaufläche kann man die Elektrizität, etwa die auf einer sehr kleinen Kugel befindliche, verschieben, ohne dass man Arbeit zu leisten braucht. Die Oberfläche des Körpers *K* ist ebenfalls eine Niveaufläche.

Ist unser Körper eine Kugel, so sind die Niveauflächen Kugelschalen. Eine solche ist in unserer Fig. 18 mit *N* bezeichnet. Transportieren wir die Elektrizitätsmenge Eins einmal auf dem Wege *a C* und ein zweites Mal auf dem Wege *a B* bis an die Niveaufläche, so ist die Arbeit nach der Definition der Niveaufläche in beiden Fällen die gleiche. Verschiebt man Elektrizität von *B* nach *C*, so braucht man keine Arbeit zu leisten. Wäre nämlich dieser Transport mit einer Arbeitsleistung verbunden, so wäre, wie leicht einzusehen, die Arbeit nicht unabhängig von dem Wege.

Es soll jetzt erklärt werden, dass ein elektrisch geladener Körper potentielle Energie besitzt und dass fliessende Elektrizität Arbeit leistet. Der Körper *K* sei wieder positiv geladen; die sehr kleine (gewichtlos gedachte), zunächst unelektrische Kugel *a* werde mit *K* in Berührung gebracht. Es fliesst dann Elektrizität von *K* auf *a* über. *a* wird jetzt von *K* abgestossen und bewegt sich bis ins Unendliche. Während ihrer Bewegung kann *a* bezw. die auf *a* befindliche Elektrizität Arbeit für uns leisten. Wir können uns dies etwa folgendermaßen klar machen. An *a* sei ein horizontal liegender Faden befestigt, der über eine Rolle (in einer vertikalen Ebene) gelegt ist, an dem zweiten Ende des Fadens sei ein passend gewähltes Gewicht befestigt, das mit zunehmender Entfernung zwischen *K* und *a* der abnehmenden Abstossung entsprechend verkleinert werden muss. Durch die von *K* sich entfernende Elektrizität wird also ein Gewicht gehoben, d. h. eine Arbeit für uns geleistet.

Den eben beschriebenen Vorgang, nämlich das Abfliessen einer gewissen Elektrizitätsmenge von *K* nach der Unendlichkeit[1]), denken wir uns so oft wiederholt, bis *K* ganz entladen ist; jedesmal gewinnen wir eine gewisse Arbeit. Addieren wir die Teilarbeiten, so erhalten wir die Arbeit, welche die ganze auf *K* befindliche Elektrizität leisten kann, wenn sie nach der Unendlichkeit abfliesst oder nach einem Orte hinfliesst, wo das Potential Null herrscht. Wir sehen also, dass die auf einem Körper angehäufte Elektrizität die Fähigkeit besitzt, Arbeit zu leisten; sie hat (so lange sie ruht) wie ein emporgehobenes, auf einer Unterlage ruhendes Gewicht potentielle Energie.

Befindet sich in der Nähe des positiv geladenen Körpers *K* unsere sehr kleine, positiv geladene Kugel *a*, und überlassen wir *a* sich selbst, so entfernt sie sich von *K* und schneidet die verschiedenen Niveauflächen senkrecht (bewegt sich auf einer Kraftlinie). Die Elektrizität bewegt sich also von selbst, vorausgesetzt natürlich, dass die Möglichkeit vorhanden ist, von Orten höheren Potentials zu solchen niedrigeren Potentials. Nehmen wir an, die Kugel *a*, auf der sich eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge befinden möge, gehe von einer Niveaufläche, der das Potential V_1 (in C.G.S.-Einheiten ausgedrückt, s. Seite 39) entspricht, über zu einer Niveaufläche mit dem Potential V_2, so leistet die sich bewegende Elektrizität die Arbeit $V_1 - V_2$ (Ergs). Gehen n elektrostatische Einheiten von dem Potential V_1 zum Potential V_2 über, so leisten sie im Ganzen eine Arbeit von $n . (V_1 - V_2)$ Arbeitseinheiten.

---

1) Praktisch genügt es anzunehmen, dass die Entfernung zwischen *K* und *a* eine relativ grosse wird bezw. so gross wird, dass in dem Punkte, in dem die Bewegung von *a* aufhört, das Potential der auf *K* befindlichen Elektrizität gleich Null angenommen werden kann. Da das Potential der Erdoberfläche gleich Null ist (s. Seite 39), so darf man annehmen, dass die Elektrizität zur Erde abfliesst. Hat *K* einen kleinen Abstand von der Erde, so ist zwar der Weg, den *a* zurücklegen muss, auch klein; trotzdem ist die Arbeit die gleiche, wie wenn *a* sich in die Unendlichkeit bewegt. Es hängt dies damit zusammen, dass die Verteilung der Elektrizität auf *K* (das Potential) sich ändert, wenn man *K* der Erde nähert.

Dadurch, dass wir die kleine Kugel *a* zu Hülfe nehmen, die durch Berührung mit *K* geladen wird, ermöglichen wir es der auf *K* befindlichen Elektrizität, nach der Unendlichkeit abzufliessen. Fliesst die Elektrizität durch einen an *K* befestigten Draht ab, so leistet jedes einzelne Elektrizitätsteilchen Arbeit; wir erhalten aber dann keine mechanische Arbeit, sondern Wärme.

Vergleicht man einen mit Elektrizität geladenen Körper mit einem Behälter, der einen gewissen Abstand von der Erdoberfläche hat und z. T. mit Wasser gefüllt ist, so entspricht der Entladung, wie sie im Vorigen beschrieben wurde, das tropfenweise Abfliessen des Wassers und der Bewegung der Elektrizität durch einen Draht das Abfliessen des Wassers durch eine Röhre.

Praktisch von Wichtigkeit ist der Fall, dass die Elektrizität auf *K* in dem Maße, in dem sie abfliesst (durch *a* wegtransportiert wird), wieder ersetzt wird. Dann wird bei jedem Transporte dieselbe Arbeit geleistet. Fliessen also n Einheiten der Elektrizität ins Unendliche, so ist die ganze Arbeit gleich n.V, wenn V das konstante Potential von *K* ist.

Nach der gegebenen Erklärung ist das Potential eine Arbeit; man gebraucht dieses Wort aber auch in dem Sinne, als ob durch dasselbe ein Zustand bezeichnet würde (dem in der Wärmelehre die Temperatur entspricht). Wenn man z. B. hört, dass das Potential eines Körpers 1000 Volt beträgt, so denkt man weniger an die Arbeit, welche die auf dem betreffenden Körper befindliche Elektrizität beim Abfliessen leisten kann oder an die Arbeit, die man leisten muss, um die Elektrizitätsmenge + 1 aus der Unendlichkeit auf den Körper zu schaffen, sondern man denkt mehr an die Fähigkeit der Elektrizität, sich auszubreiten, an ihre Tendenz, den Körper zu verlassen.

Werden zwei mit Elektrizität beladene Körper, deren Potentiale verschiedene Werte haben, durch einen Leiter miteinander verbunden, etwa durch einen Draht, so bewegt sich die Elektrizität so lange, bis die Potentialdifferenz ausgeglichen ist, bis also beide Körper dasselbe Potential haben.

Die beiden durch den Draht miteinander verbundenen Körper (aus Metall oder dergl.) kann man als einen einzigen Körper ansehen. Bei einem solchen muss aber das Potential auf der ganzen Oberfläche denselben Wert haben; mithin muss nach Herstellung der leitenden Verbindung eine Bewegung der Elektrizität erfolgen.

Von der Erde und allen Körpern, die man als unelektrische zu bezeichnen pflegt, sagt man, sie besässen das Potential Null. Wird ein elektrisierter Körper mit der Erde durch einen Draht verbunden, so hat er nach sehr kurzer Zeit das Potential Null. Das Potential der Erde ändert sich nämlich nicht, wenn man ihr eine im Vergleich zu ihrer Grösse kleine Elektrizitätsmenge zuführt.

Befindet sich auf einem Körper negative Elektrizität, so muss ich Arbeit leisten, wenn ich die mit der Elektrizitätsmenge + 1 beladene Kugel *a* (Fig. 18) von ihm entfernen will (eben wurde Arbeit gewonnen). Da nun gewonnene und von mir geleistete Arbeit in einem ähnlichen Verhältnisse zueinander stehen wie Einnahme und Ausgabe (+ und —), so sagen wir von einem negativ geladenen Körper, dass er ein negatives Potential besitzt.

Als Einheit des Potentials dient 1 Volt; eine Definition für diese Einheit wird später gegeben (s. Seite 60 und Anhang). Die Apparate, mittels deren man Potentiale in Volt misst, nennt man Elektrometer; sie beruhen auf der Anziehung bezw. Abstossung, die zwei geladene Körper aufeinander ausüben. Von der Beschreibung dieser Apparate können wir absehen. Da wir uns nämlich mit den Eigenschaften und Wirkungen des elektrischen Stromes beschäftigen, so kommen für uns fast nur Potentialdifferenzen in Betracht, und diese werden fast immer mit Hülfe des Voltmeters gemessen (s. Messinstrumente).

Wenn sich auf einer Kugel von 1 cm Radius die Elektrizitätsmenge + 1 (elektrostatische Einheit) befindet, so ist die Arbeit, die man leisten muss, um eine neue Elektrizitätsmenge + 1 auf die geladene Kugel zu schaffen, gleich einer absoluten Arbeitseinheit (1 Erg). Das Potential der Kugel (mit + 1) wäre demnach als die absolute (C.G.S.-)Einheit des Potentials zu bezeichnen. Hiervon ist 1 Volt der dreihundertste Teil.

Spannung. Wird einem Körper, etwa einer Metallkugel, Elektrizität zugeführt, so sammelt sich diese, wie man experimentell nachweisen kann, nur an der Oberfläche, sie bildet dort eine ausserordentlich dünne Schicht. Da sich die einzelnen Elektrizitätsteilchen gegenseitig abstossen, so hat die

auf dem Körper angehäufte Elektrizität das Bestreben, den Körper zu verlassen, sich im Raume auszubreiten. Diese Tendenz der Elektrizität bezeichnet man wohl als Spannung. In dieser Hinsicht verhält sich also die Elektrizität ähnlich wie ein Gas, das sich in einem abgeschlossenem Raume befindet. Jedes Elektrizitätsteilchen sucht jedes andere von der Kugel wegzutreiben; die sämtlichen auf ein herausgegriffenes Elektrizitätsatom wirkenden Kräfte kann man sich zu einer einzigen Kraft zusammengesetzt denken; die Richtung dieser Kraft steht senkrecht auf der Kugeloberfläche, und ihre Grösse ist ein Maß für die Spannung.

Wenn der elektrisierte Körper keine Kugel ist, so verteilt sich die Elektrizität nicht gleichmässig auf seiner Oberfläche; infolgedessen ist die Spannung — in dem angegebenen Sinne — an den verschiedenen Punkten der Oberfläche nicht dieselbe; bei dem Konduktor einer Elektrisiermaschine ist die Spannung an den beiden Enden grösser als in der Mitte; das Potential aber hat, um es noch einmal hervorzuheben, für die ganze Oberfläche denselben Wert.

Angenommen, es seien zwei Konduktoren von gleichen Dimensionen, die einen grösseren Abstand haben, mit gleichen Elektrizitätsmengen desselben Vorzeichens geladen. Verbindet man ein Ende des ersten Konduktors mit der Mitte des zweiten durch einen Draht, so sind zwei Punkte, zwischen denen eine „Spannungsdifferenz" besteht, miteinander verbunden; eine Bewegung der Elektrizität erfolgt jedoch nicht.

Das Wort Spannung wird noch in einem anderen Sinne gebraucht. Besonders in der Elektrotechnik ist Spannung gleichbedeutend mit Potentialdifferenz. Wenn also gesagt wird, die Klemmenspannung einer Dynamo beträgt 100 Volt, so heisst das: das Potential der einen Klemme ist um 100 Volt höher als dasjenige der anderen. Dem Begriffe Spannung in diesem Sinne entspricht ebenfalls eine gewisse Tendenz der Elektrizität, sich in Bewegung zu setzen, um die vorhandene Potentialdifferenz auszugleichen.

Endlich sei noch erwähnt, dass manche Autoren das Wort „Spannung" als gleichbedeutend mit „Potential" gebrauchen, so dass bei ihnen Spannungsdifferenz = Potentialdifferenz ist.

4. **Kapazität, Kondensator, Dielektrikum.** Ein unelektrischer Körper werde durch Zufuhr von positiver Elektrizität so stark geladen, dass sein Potential gerade 1 Volt beträgt. Die hierzu nötige Elektrizitätsmenge, in Coulomb ausgedrückt, sei C. Man nennt dann C die Kapazität des Körpers. Ist C = 1 Coulomb, so sagt man von unserem Körper, dass er eine Kapazität von 1 Farad[1]) besitzt. Die Kapazität eines Körpers ist also 1 Farad, wenn er dadurch, dass man ihm 1 Coulomb positiver Elektrizität zuführt, bis zum Potential 1 Volt geladen wird (bezw. sein Potential um 1 Volt steigt).

Eine Kugel von 1 cm Radius wird durch $^1/_{300}$ elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge bis zum Potential 1 Volt geladen, oder eine Kugel von 300 cm wird durch die Elektrizitätsmenge +1 auf 1 Volt gebracht. Soll also eine Kugel durch 1 Coulomb ($= 3 . 10^9$ elektrostat. Einh.) bis zu 1 Volt geladen werden, so muss sie einen Radius von $300 . 3 . 10^9 = 9 . 10^{11}$ cm haben. Der Radius der Erde beträgt etwa $6370 . 10^5$ cm, also bedeutend weniger als 10^9 cm.

1 Farad ist eine unbequem grosse Einheit. Deshalb benutzt man meistens eine Einheit der Kapazität, die der millionste Teil eines Farad's ist; man nennt sie Mikrofarad[2]),

$$1 \text{ Farad} = 10^6 \text{ Mikrofarad.}$$

Es sei P_1 in Figur 19 eine Metallplatte, die sorgfältig isoliert ist (z. B. auf einer Glassäule ruht). Wird P_1 mit dem positiv geladenen Konduktor einer Elektrisiermaschine verbunden — von dem wir annehmen wollen, dass er auf konstantem Potential gehalten wird —, so fliesst solange Elektrizität auf P_1, bis beide Körper dasselbe Potential haben. Die leitende Verbindung zwischen P_1 und dem Konduktor werde jetzt beseitigt und dann der Platte P_1 eine mit der Erde (Wasser- oder Gasleitung) verbundene Metallplatte P_2 genähert. Die auf P_1 befindliche Elektrizität wirkt influenzierend (verteilend,

---

1) Zu Ehren Faradays.

2) Durch Vorsetzen des Wortes Mikro vor eine Einheit wird ausgedrückt, dass man den millionsten Teil der betreffenden Einheit nehmen soll. 1 Mikrovolt ist also 1 Volt : 10^6.

zerlegend) auf die neutrale Elektrizität von P_2; positive Elektrizität fliesst von P_2 zur Erde, während ein gewisses Quantum negativer Elektrizität durch die auf P_1 befindliche positive Ladung festgehalten (angezogen, gebunden, am Abfliessen verhindert) wird. Umgekehrt bindet die auf P_2 befindliche negative Elektrizität die Ladung auf P_1. Dies hat zur Folge, dass das Potential von P_1 sinkt. Dadurch also, dass man einem geladenen Körper einen anderen zur Erde abgeleiteten Leiter nähert, wird das Potential des Körpers erniedrigt. Je mehr man P_2 der Platte P_1 nähert, umsomehr sinkt das Potential auf P_1.

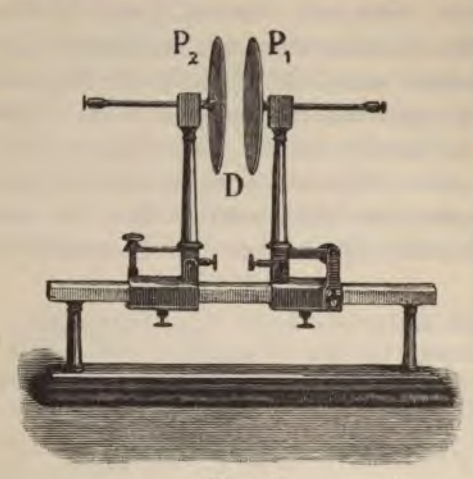


Fig. 19.

Man kann dies durch folgenden einfachen Versuch zeigen. Bei möglichst grossem Abstande zwischen P_1 und P_2 (s. Fig. 19) lade man P_1, die durch einen Draht mit einem Elektroskop verbunden ist. Nähert man jetzt die mit der Erde verbundene Platte P_2, so wird der Ausschlag am Elektroskop kleiner, bei der Entfernung wird er wieder grösser. Der Ausschlag der Elektroskopblättchen ist ein Maß für das Potential der Platte P_1.

Stellen wir die Verbindung zwischen P_1 und dem Konduktor wieder her, so fliesst neue Elektrizität auf P_1. Diese wirkt wieder verteilend auf die neutrale Elektrizität von P_2 etc. Dadurch also, dass wir der Platte P_1 einen mit der Erde verbundenen Leiter nähern, vergrössern wir die Kapazität von P_1.

Die in unserer Figur dargestellte Anordnung, bestehend aus zwei parallelen, sich gegenüberstehenden Platten, zwischen denen sich eine die Elektrizität nicht leitende Schicht (in der Figur eine Luftschicht) befindet, nennt man Kondensator. Mit Hülfe eines solchen Apparates kann man also auf ver-

hältnismässig kleinen Flächen relativ grosse Elektrizitätsmengen ansammeln (Ansammlungsapparat). Die die beiden Platten trennende, die Elektrizität nicht bezw. sehr schlecht leitende Substanz nennt man Dielektrikum. Bei der bekannten Leydener Flasche ist das Dielektrikum Glas. Ausser Glas verwendet man als Dielektrikum Glimmer, mit Paraffin durchtränktes Papier, Seife u. dgl.; statt der Metallplatten benutzt man dünne Stanniolblätter.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von verschiedenen Umständen ab. Zunächst wächst die Kapazität mit der Grösse der Platten bezw. der Belegungen; je kleiner ferner die Entfernung zwischen P_1 und P_2 ist, um so grösser ist die Kapazität, um so mehr Elektrizität kann also die Platte P_1 aufnehmen, ehe sie bis zum Potential des Konduktors geladen ist. Endlich spielt das Dielektrikum eine wichtige Rolle.

Für die Entwickelung der Elektrophysik waren die Untersuchungen Faradays über den Einfluss, den das zwischen den beiden Platten bezw. Belegungen liegende Material auf die Kapazität ausübt, von hervorragender Bedeutung. Er fand, dass die Kapazität eines Kondensators beträchtlich stieg, wenn man zwischen die beiden Platten Schellack, Glas oder Schwefel brachte, also das Dielektrikum Luft durch eine der genannten Substanzen ersetzte. Nennt man die Kapazität eines Kondensators, wenn das Dielektrikum Luft ist, Q_1 und bezeichnet man sie mit Q_k, wenn das Dielektrikum eine andere Substanz (z. B. Glas) ist, so ist $\frac{Q_k}{Q_1}$ die Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ der betreffenden Substanz. Für gewisse Glassorten z. B. ist $\varkappa = 6$, d. h. schiebt man zwischen P_1 und P_2 (Fig. 19) eine den ganzen Zwischenraum ausfüllende Platte aus dem betreffenden Glase, so ist die Kapazität des neuen Kondensators 6 mal so gross, wie sie vorher war. Die Dielektrizitätskonstante hängt in hohem Maße von der physikalischen und chemischen Natur des Materials ab, aus dem das Dielektrikum besteht (Temperatur, Dichte, chemische Zusammensetzung, vor allem das elektrische Leitungsvermögen). Für gewöhnliches Glas fanden verschiedene Beobachter Werte, die

liegen zwischen 3,24 und 8,45, für Ebonit zwischen 2,08 und 3,48, Glimmer zwischen 6,64 und 10[1]).

Nennt man den optischen Brechungsexponenten einer Substanz n, so verlangt die elektromagnetische Lichttheorie (Maxwell), dass $\varkappa = n^2$. Die Untersuchungen für Gase von Boltzmann und Klemenčič ergaben sehr gute Übereinstimmung. Bei festen und flüssigen Substanzen standen einigen sehr gut übereinstimmenden Resultaten andere gar nicht übereinstimmende gegenüber. (Näheres siehe C. Heinke, l. c. S. 335 ff.)

Dass wir es bei der elektrostatischen Anziehung und Abstossung nicht mit einer „unvermittelten Fernwirkung" zu tun haben, geht aus dem Umstande hervor, dass sich die Kräfte, die geladene Körper aufeinander ausüben, mit der Natur des Mediums, in dem sie sich befinden, ändern. Ziehen sie sich im Vakuum mit der Kraft P an, so beträgt diese Kraft in einem anderen Medium $\frac{P}{\varkappa}$. Gerade diese Tatsache dürfte wie keine andere für die Richtigkeit der Faradayschen Ansicht sprechen, nach der sich eine Wirkung nur dann an einem anderen Orte geltend macht, wenn sie von Teilchen zu Teilchen des Mediums von ihrem Ursprungsorte nach einer anderen Stelle des Raumes hin vermittelt wird.

Nennen wir die Kapazität eines Körpers oder eines Kondensators C und das Potential, bis zu dem er durch eine ihm zugeführte Elektrizitätsmenge Q geladen wird, E, so besteht die Beziehung

$$Q = C \cdot E.$$

Bei der Anwendung dieser Gleichung ist zu beachten, dass E in Volt, Q in Coulomb und C in Farad auszudrücken ist.

5. **Elektromotorische Kraft und Stromstärke.** Wenn man zwei Leiter der Elektrizität, etwa zwei Messingkugeln K_1 und K_2, die verschiedene Potentiale haben, durch einen Draht miteinander verbindet, so setzt sich die Elektrizität in Bewegung und fliesst solange von dem Körper, der das höhere Potential hat, zu dem Körper mit dem niedrigeren Potential, bis sich die Potentialdifferenz ausgeglichen hat. Der Ausgleich geht in ausserordentlich kurzer Zeit, in einem winzigen

---

1) Zusammenstellung der gemessenen Grenzwerte von Dielektrizitätskonstanten siehe C. Heinke, Handbuch der Elektrotechnik I, 1 S. 337.

Bruchteile einer Sekunde, vor sich. Wird nun durch irgend eine Kraft die auf K_2 ankommende Elektrizität nach K_1 zurückbefördert oder wird sonstwie die Potentialdifferenz immer wieder von neuem hergestellt, so fliesst längere Zeit, nämlich solange die Kraft tätig ist, durch unseren Draht ein elektrischer Strom, und wir werden die Kraft als elektromotorische Kraft bezeichnen. Die elektromotorische Kraft ist also die Ursache, die bewirkt, dass eine Potentialdifferenz zwischen zwei Körpern K_1 und K_2 hergestellt und aufrecht erhalten wird. K_1 und K_2 nennen wir die Pole.

Ehe wir fortfahren, wollen wir eine Analogie zu Hülfe nehmen. Durch eine Pumpe *P* (Fig. 20) werde in jeder Sekunde 1 Liter Wasser in das Reservoir R_1 gehoben; gerade soviel Wasser möge durch die Röhren *a* und *b* in jeder Sekunde abfliessen. Wir erhalten dann, so lange die Pumpe in Tätigkeit ist, einen konstanten Wasserstrom. Die beschriebene Vorrichtung kann man mit einer Stromquelle, z. B. einem galvanischen Elemente, vergleichen: den beiden Behältern entsprechen die beiden Pole, den verschiedenen Niveaus die verschiedenen Potentiale der Pole; der Rohrleitung *a* und *b* entspricht ein die beiden Pole verbindender Draht (Schliessungsdraht) oder der äussere Stromkreis. Die Tätigkeit der Pumpe, durch welche die Niveaudifferenz stets wiederhergestellt wird, lässt sich vergleichen mit der elektromotorischen Kraft. Als Maß für die elektromotorische Kraft dient die durch sie hervorgerufene Wirkung, nämlich die von ihr hergestellte Potentialdifferenz. Da man Potentiale und daher auch Potentialdifferenzen in Volt misst, so werden auch elektromotorische Kräfte in Volt ausgedrückt (s. auch die spätere Erklärung für 1 Volt S. 60).

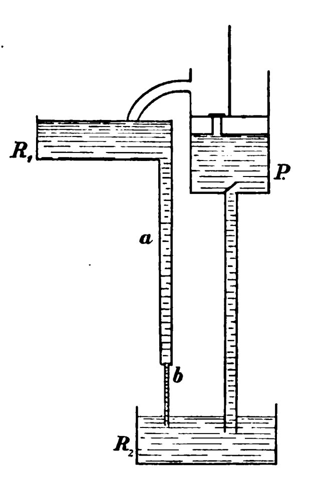


Fig. 20.

Unseren Annahmen gemäss fliesst in 1 Sekunde 1 Liter Wasser aus R_1 in R_2. Mithin muss durch jeden Querschnitt der Röhre *a*, aber auch durch jeden Querschnitt der Röhre *b* in jeder Sekunde 1 Liter Wasser hindurchgehen. (Natürlich ist die Geschwindigkeit, mit der das Wasser durch *b* hindurchfliesst, grösser als in *a*.) Verallgemeinert: in jeder einfachen, d. h. nicht verzweigten, Wasserleitung fliesst in derselben Zeit durch jeden Querschnitt der Leitung dieselbe Menge Wasser. Diesen Satz kann man ohne weiteres auf die Bewegung der Elektrizität übertragen: *bei einer unverzweigten Leitung fliesst durch jeden Querschnitt der Leitung in ein und derselben Zeit* die gleiche Elektrizitätsmenge, auch wenn Drähte von verschiedenem Querschnitt nacheinander durchflossen werden.

Wir werden später (s. Kabeltelegraphie) sehen, dass es Ausnahmen von dieser Regel gibt.

Diejenige Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt einer Leitung fliesst, nennt man die *Stromstärke*. Beträgt diese Elektrizitätsmenge 1 Coulomb, *fliesst* also *durch einen beliebigen Querschnitt* der Leitung *in 1 Sekunde* im Ganzen *1 Coulomb Elektrizität*, so ist die Stromstärke gleich 1 *Ampere*[1]. Es fragt sich nun, woran man erkennt, ob ein Strom 1 Ampere stark ist. Da das elektrische Fluidum selbst einer direkten Messung nicht zugänglich ist, so sind wir darauf angewiesen, eine durch fliessende Elektrizität hervorgerufene sichtbare Wirkung für die Messung zu verwerten; am einfachsten benutzt man hierfür die chemischen Wirkungen, mit denen wir uns später eingehender beschäftigen werden. Schickt man durch eine Lösung von salpetersaurem Silber ($AgNO_3$) einen elektrischen Strom, so schlägt sich auf der einen Elektrode[2] metallisches Silber nieder. Die abgeschiedene Silbermenge ist proportional der durch die Lösung geflossenen Elektrizitäts-

1) Dem französischen Physiker Ampère zu Ehren.

2) Elektroden nennt man die beiden Leiter (dünne Metallplatten, Kohlenstifte etc.), die man in die Lösung eintaucht.

menge. Hat nun ein Strom eine konstante Stärke von 1 Amp., so werden durch ihn in einer Minute 67,2 Milligramm Silber in Freiheit gesetzt.

Man kann daher 1 Ampere auch folgendermaßen definieren: Ein Strom ist 1 Amp. stark, wenn durch ihn aus einer wässerigen Lösung von Silbernitrat in 1 Sekunde 1,118 Milligramm Silber abgeschieden werden. In den gesetzlichen Bestimmungen vom 6. Mai 1901 sind die näheren Bedingungen angegeben, unter denen die Abscheidung des Silbers stattzufinden hat [1]).

Zuweilen wird für die Definition des Begriffes Ampere die Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure benutzt. Da ist zu bemerken, dass wegen der Bildung von Nebenprodukten (s. Elektrochemie) die frei gewordenen Gasmengen nicht genau proportional der durch den Apparat geflossenen Elektrizitätsmenge sind, dass unter Umständen sogar bedeutende Abweichungen vorkommen können.

6. Der elektrische Leitungswiderstand, Rheostate.

Nach der früher gemachten Annahme besteht ein elektrischer Strom darin, dass sich das elektrische Fluidum im Innern eines Leiters bewegt. Hierbei findet, so schliessen wir weiter, zwischen den Elektrizitätsteilchen und den Molekülen des Leiters Reibung statt, ähnlich wie sich Wasser, das durch eine mit vielen kleinen Kieselsteinen gefüllte Röhre fliesst, an diesen reibt. Es setzt daher jeder Leiter der Bewegung der Elektrizität einen gewissen Widerstand entgegen. Wenn unsere Erklärung des elektrischen Leitungswiderstandes (als Reibungswiderstand) eine den Erfahrungstatsachen Rechnung tragende ist, so muss sich jeder Leiter, durch den ein elektrischer Strom fliesst, erwärmen. Dass dies der Fall ist, kann man leicht experimentell beweisen.

Ein dünner, in einen Stromkreis eingeschalteter Eisendraht wird heiss und glüht, wenn man einen genügend starken Strom wählt. Um zu zeigen, dass auch durch schwache Ströme eine Erwärmung herbeigeführt wird, kann man sich des in Fig. 21 (S. 48) abgebildeten Apparates bedienen. Eine der beiden U-förmig gekrümmten Röhren wird mit gefärbtem Wasser z. T. angefüllt und dann der an der Glaskugel angebrachte Hahn geschlossen.

---

1) Siehe Elektrot. Ztschr. 1901 S. 435 u. 531; Elektrot. Anzeiger 1901 Nr. 39 S. 1336.

Schickt man nun durch die zugehörige Spirale — für unseren Versuch genügt eine Hälfte des Apparates — einen schwachen Strom, so gibt diese Wärme an die eingeschlossene Luft ab. Da sich die Luft ausdehnt, so bildet sich eine Niveaudifferenz aus. Beobachten wir also umgekehrt, dass bei Stromdurchgang eine Niveaudifferenz entsteht, so schliessen wir, dass durch den Strom in der Spirale Wärme erzeugt worden ist. (Siehe auch Joulesche Wärme.)

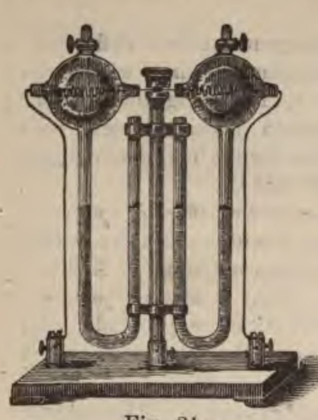


Fig. 21.

Je grösser der Widerstand eines Leiters ist, um so geringer ist seine Fähigkeit, sein Vermögen, die Elektrizität zu leiten — Leitungsvermögen, Leitvermögen, Leitfähigkeit. Leitungswiderstand und Leitvermögen verhalten sich also wie a zu $\frac{1}{a}$.

In diesem Abschnitte werden hauptsächlich die Leiter behandelt, die bei Stromdurchgang chemisch nicht verändert werden, die sogenannten Leiter erster Klasse. Dazu gehören die Metalle, Kohle[1]), Selen, Bleisuperoxyd, Braunstein[2]) und noch einige andere Substanzen. Man sagt von diesen Materialien, dass sie den Strom metallisch leiten. Die Gase werden in dem Abschnitte Gasentladungen, die Flüssigkeiten (ausser Quecksilber) in dem Kapitel Elektrochemie besprochen.

Diejenigen Substanzen, die den elektrischen Strom sehr schlecht oder, wie man gewöhnlich sagt, nicht leiten, werden Isolatoren[3]) genannt. Hierzu gehören Thon (gebrannt),

1) Als Koks, Gasretortenkohle. Steinkohle und Holzkohle leiten den Strom sehr schlecht.

2) Das Leitvermögen der Oxyde und Sulfide der Metalle ist von F. Streintz näher untersucht worden. S. Physikal. Zeitschr. IV S. 106.

3) Vom italienischen isola = Insel abgeleitet. Umgibt man einen elektrisch geladenen Leiter überall mit Isolatoren, so wird seine Elektrizität gleichsam vom Verkehr mit anderen Leitern abgeschnitten.

Glas, Porzellan, Marmor, Paraffin, Kautschuk, Gummi, Ebonit[1]), Seide, Papier, Glimmer. (Diese Materialien hat man wahrscheinlich alle zu den später zu besprechenden Leitern zweiter Klasse zu rechnen.) Wir werden noch in diesem Abschnitte sehen, dass bei höherer Temperatur die meisten Isolatoren den elektrischen Strom gut leiten.

Der elektrische Widerstand der metallisch leitenden Substanzen hängt, wie die Erfahrung lehrt, von einer ganzen Reihe von Faktoren ab. Diese sollen jetzt der Reihe nach besprochen werden.

1) Der Leitungswiderstand einer bestimmten Substanz, z. B. des Kupfers, ist proportional der Länge des Leiters; in demselben Maße also, in dem die Länge eines überall gleich dicken Kupferdrahtes zunimmt, wächst sein elektrischer Widerstand. Man sieht dies übrigens auch ohne weiteres ein: die fliessende Elektrizität findet in jedem noch so kleinem Stücke des Drahtes Widerstand, und der gesamte Widerstand ist die Summe der Teilwiderstände.

2) Versuche lehren uns, dass der Widerstand, den der elektrische Strom in einem Leiter zu überwinden hat, in demselben Verhältnisse abnimmt, in dem der Querschnitt wächst, oder mathematisch ausgedrückt: der Widerstand eines Leiters ist umgekehrt proportional seinem Querschnitte. Hat man also beispielsweise Kupferdrähte von 1 mm², 2 mm² etc., die alle gleiche Länge haben, und ist der Widerstand in dem ersten Drahte w, so ist er in dem zweiten Drahte $\frac{w}{2}$, in dem dritten $\frac{w}{3}$ etc. Die Gestalt des Querschnittes spielt keine Rolle.

3) Verfertigen wir uns aus den verschiedenen Materialien, z. B. aus Kupfer, Eisen, Blei, Drähte von gleicher Länge und gleichem Querschnitte, so finden wir, dass deren Widerstände verschieden gross sind; den kleinsten hat der Kupferdraht, den grössten der Bleidraht (Materialkoeffizient).

---

1) Ebonit wird aus Gummi und Schwefel hergestellt.

Durch kleine Verunreinigungen oder Beimengung anderer Materialien wird der Widerstand ziemlich stark beeinflusst, wie Matthiesen schon 1860 nachwies. „Nach ihm würde eine Beimengung von nur 0,05 % Kohlenstoff zum Kupfer die Leitfähigkeit desselben um etwa 20 % seines Anfangswertes verkleinern.“ (Handbuch der Elektrotechnik I, 2 S. 237.) Ähnlich wie Kohlenstoff wirken Schwefel und Phosphor.

Auch spielt das ganze Vorleben des Materials eine Rolle. Einen besonderen Einfluss übt das „Härten“ (plötzliches Ablöschen nach starker Erhitzung) aus. Infolge mechanischer Beanspruchung ändert sich ebenfalls der Widerstand; Zugbelastung z. B. bewirkt eine Widerstandvergrösserung sowohl infolge von Querschnittsänderung wie auch infolge von Strukturänderung des Materials.

Es sei darauf aufmerksam gemacht, dass alle metallisch leitenden Substanzen undurchsichtig sind bezw. erst in sehr dünnen Schichten durchscheinend werden.

Als Einheit des Leitungswiderstandes dient jetzt allgemein das internationale Ohm. Man versteht darunter den Widerstand, den der elektrische Strom in einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 mm² Querschnitt bei der Temperatur 0° findet. Eine solche Säule erhält man, wenn man eine Glasröhre von den vorgeschriebenen Dimensionen mit chemisch reinem Quecksilber füllt.

Ersetzt man die in einen Stromkreis eingeschaltete Quecksilbersäule von 1 Ohm (Ω) Widerstand durch Kupferdraht von 1 mm² Querschnitt, so findet man, dass man ungefähr 60 m dieses Drahtes einschalten muss, ehe der Strom denselben Widerstand wie eben findet. Daher ist der Widerstand in einem Kupferdrahte von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt ungefähr gleich $\frac{1}{60}$ Ohm. $\frac{1}{60}\ \Omega$ nennt man den spezifischen Widerstand des Kupfers. Allgemein versteht man unter dem spezifischen Widerstand ϱ[1]) eines Stoffes den in Ohm ausgedrückten Widerstand, den der elektrische Strom in einem Drahte von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt, hergestellt aus dem betreffenden Stoffe

1) Hier und im Folgenden werden die vom Elektrotechn. Verein Berlin vorgeschlagenen Bezeichnungen gebraucht.

findet. Den Bruch $\frac{1}{\varrho}$ nennt man das spezifische Leitvermögen oder die spezifische Leitfähigkeit. Die physikalische Bedeutung dieses Begriffes ergibt sich aus folgendem Beispiele: das spezifische Leitvermögen des chemisch reinen Kupfers ist (ungefähr) 60, d. h. der Strom findet in 60 m Kupferdraht von 1 mm² (bei 15° Cels.) einen Widerstand von 1 Ohm.

Wenn eine Leitung (einfach) eine Länge von L Metern hat, und ihr Querschnitt q mm² beträgt, so ist ihr in Ohm ausgedrückter Widerstand w

$$w = \frac{L \cdot \varrho}{q}.$$

Die Werte von ϱ bei 15° für einige oft benutzte Leiter sind in der folgenden Tabelle[1]) zusammengestellt.

Tabelle I.

	ϱ	α
Aluminium	0,028	0,00388
Blei	0,21	0,00395
Eisendraht	0,13	0,0046
Kupfer (rein)	0,0163	0,0036
" (käuflich)	0,0174	0,004
Quecksilber	0,941	0,0009

Für die Herstellung von Widerständen (s. Rheostate) findet eine Reihe fester Legierungen mit geringem Temperaturkoeffizienten α (s. unten) Verwendung.

Tabelle II.

	ϱ	α
Kruppin	0,848	0,00085
Mangankupfer	1,007	0,00004
Neusilber	0,301	0,00036
Nickelin	0,333—0,45	0,0003

Neusilber ist zusammengesetzt aus Kupfer, Zink und Nickel, ebenso Nickelin, beide enthalten ausserdem geringe Mengen Eisen, letzteres enthält noch 0,2 bis 0,3 % Mangan.

1) Die meisten Zahlen sind dem Handbuch der Elektrotechnik entnommen.

In der Formel für den Leitungswiderstand kommen vier Grössen vor; kennt man von diesen drei, so kann man die vierte berechnen. Sind z. B. L, W und ϱ bekannt, so kann man q finden. Beispiel: Zwei Orte, deren Entfernung 500 m beträgt, sollen durch eine Kupferleitung (Hin- und Rückleitung) miteinander verbunden werden; der Widerstand in der Leitung soll 3 Ohm betragen. Welchen Querschnitt muss man wählen? Setzen wir $\varrho = \frac{1}{60}$, so ist

$$3 = \frac{(2 . 500) . 1}{60\ q}.$$ Es folgt $q = 5{,}56\ mm^2$.

In der Praxis misst man nicht den Querschnitt eines Drahtes, sondern seinen Durchmesser. Hierbei bedient man sich eines einfachen Apparates, des sogen. Kalibermaßstabes. Beträgt der gemessene Durchmesser d mm, so ist

$$q = \frac{d^2}{4} . 3{,}14\ mm^2.$$

Mit Hülfe einer Wage und eines Metermaßes kann man den Querschnitt eines Drahtes bestimmen, wenn man das spezifische Gewicht des betreffenden Metalles kennt. Beispiel: Ein 5 m langes Stück eines Kupferdrahtes wiege 45 Gramm. Setzen wir das spezifische Gewicht des Kupfers gleich 8,9, so erhält man den Querschnitt q in Quadratmillimetern aus der Gleichung

$$q . 5000 . 8{,}9 = 45\,000.$$

Man drückt also die Länge in Millimetern und das Gewicht in Milligrammen aus.

Änderung des Widerstandes mit der Temperatur. Für die Leiter erster Klasse gilt als Regel, dass ihr spezifischer Widerstand grösser wird, wenn ihre Temperatur steigt (eine Ausnahme bildet die Kohle). Die Widerstandsänderung bei Temperaturänderung kann proportional der Temperaturdifferenz gesetzt werden. Finden wir beispielsweise, dass eine Spirale aus dünnem Eisendraht bei 15° einen Widerstand von 20 Ω und bei 16° einen solchen von 20,09 Ω hat, so ist ihr Widerstand bei 115° (angenähert) $20 + 100 . 0{,}09 = 29\ \Omega$. Dieses Beispiel zeigt uns übrigens, dass die Widerstandszunahme infolge Erhöhung der Temperatur eine Erscheinung ist, mit der man in der Praxis wohl zu rechnen hat. Die Änderung des spezifischen Widerstandes einer Substanz pro 1° Temperaturerhöhung nennt man den Temperaturkoeffi-

zienten des betreffenden Stoffes (α). Diese Koeffizienten sind in den Tabellen I und II angegeben. Wie man sieht, haben die angeführten Metalllegierungen einen sehr kleinen Temperaturkoeffizient; sie ändern also bei der Erwärmung ihren Widerstand nur in geringem Maße, weshalb man sie mit Vorliebe für solche Widerstände benutzt, deren Grösse möglichst unabhängig von der Temperatur sein soll.

Versuch: Eine längere U-förmige Spirale aus dünnem Eisendraht nebst einem Amperemeter schalte man in einen Stromkreis ein (der Widerstand in den übrigen Teilen des Stromkreises muss möglichst klein sein). Nach dem Einschalten nimmt der Strom zuerst schnell, dann langsam ab, weil die Spirale durch den Strom selbst erwärmt wird. Erhitzt man die Spirale mittels einer Bunsenschen Flamme, so erfolgt eine weitere (stärkere) Abnahme der Stromstärke. Taucht man die Spirale jetzt in Alkohol, so wird der Strom plötzlich stärker.

Als Faustregel kann man sich für Kupfer merken, dass sein Widerstand bei 100° Erwärmung um rund 40% des ursprünglichen Widerstandes wächst.

Bezeichnet man den Widerstand eines Leiters bei 15° mit W_{15} und bei t° mit W_t, so ist

$$W_t = W_{15}\,[1 + (t - 15)\,\alpha].$$

Bei sehr tiefen Temperaturen erreicht die Leitfähigkeit der Metalle sehr grosse Werte. Wroblewski[1]) fand z. B. für Kupfer, dass sein Widerstand in der Nähe von —200° nur etwa 11% desjenigen bei 0° ist. Die Untersuchungen von Dewar haben jedoch ergeben, dass ein sogenannter Widerstandsnullpunkt (Temperatur, bei der der Widerstand der Metalle Null ist) nicht erreicht wird.

Die Isolatoren verhalten sich umgekehrt wie die Metalle. Dass z. B. Glas bei höherer Temperatur den elektrischen Strom gut leitet, kann man folgendermaßen nachweisen. Man umwickelt eine Glasröhre an zwei Stellen, die 1—2 cm Abstand haben, mit Kupferlitze und schaltet das so begrenzte Stückchen nebst einem geeigneten Galvanoskop oder Amperemeter in einen Stromkreis ein. Das Galvanoskop zeigt zunächst wegen des ausserordentlich grossen Widerstandes, den die Elektrizität in dem Glase findet, keinen Strom an. Erhitzt man aber das Stückchen Glasröhre mittels einer Bunsen-Flamme, so fängt nach

1) Wiedemanns Annalen 26 S. 27.

einiger Zeit der Zeiger des Galvanoskops an sich zu bewegen. Bei 110 Volt kommt ein Strom von mehreren Ampere zu stande, durch den das Glas so stark erhitzt wird, dass es nach Entfernung der Flamme weiter glüht.

Unter denjenigen Nichtmetallen, die zu den Leitern erster Klasse gehören, verdient besondere Erwähnung das Selen. Dieses in seinem chemischen Verhalten dem Schwefel nahestehende Element hat, wie zuerst W. v. Siemens nachwies, die Eigenschaft, in dünnen Schichten seinen Widerstand zu verringern, wenn es belichtet wird. So z. B. sinkt der Widerstand eines von Ruhmer[1]) hergestellten Präparates von 40000 Ohm im Dunkeln auf 1950 Ohm bei greller Belichtung. — Offene Selenpräparate (Selenzellen) verändern sich mit zunehmendem Alter und verlieren ihre Lichtempfindlichkeit immer mehr. Um besonders konstante Zellen zu erhalten, wird die Überführung des Selens in die krystallinische Modifikation — nur diese eignet sich für Selenzellen — im Vakuum vorgenommen und das Präparat in ein evakuiertes Glas eingeschlossen. Es sind Versuche gemacht worden, die erwähnte Eigenschaft des Selens für eine Lichttelephonie zu verwerten; diese haben für nahe Entfernungen (bis zu 10 km) zu sehr günstigen Resultaten geführt.

Endlich sei noch die interessante Eigenschaft gewisser Metalle, besonders des Wismuths, erwähnt, in einem magnetischen Felde ihren elektrischen Widerstand zu ändern.

Rheostate. Unter einem Rheostat versteht man einen Widerstand, dessen Grösse man in einfacher Weise verändern kann. Neben den Stromquellen sind die Rheostate die wichtigsten Apparate, die man beim Experimentieren mit elektrischen Strömen nötig hat. Ferner finden veränderliche Widerstände in elektrischen Anlagen als Regulier- oder Vorschaltwiderstände ausgedehnte Verwendung (cf. Nebenschlussmaschine, Bogenlampen, Elektromotoren). Mit Rücksicht auf das Material, aus dem der Widerstand hergestellt ist, unterscheidet man zwischen Metall- und Flüssigkeitswiderständen.

1) Metallwiderstände. Es sollen hier nur einige wenige der gebräuchlichen Formen beschrieben werden.

a) Kurbelwiderstände. Die Strombahn besteht aus Spiralen oder Bändern, und zwar benutzt man wegen ihres grossen spezifischen Widerstandes (Ersparnis an Material) und

---

1) Physikal. Zeitschr. III S. 468; Elektrot. Zeitschr. 1904 S. 1021.

ihres geringen Temperaturkoeffizienten (Konstanz) hauptsächlich die in Tabelle II (S. 51) angegebenen Metalllegierungen. Das Prinzip des Kurbelrheostates ergibt sich aus der schematischen Figur 22. *h* ist eine um *b* drehbare, mit isoliertem Griffe versehene Metallkurbel; s_1, s_2 etc. sind Drahtspiralen, a_1 bis a_5 Kontaktstücke, nämlich kleine auf der Unterlage senkrecht stehende und gegen dieselbe isolierte Metallcylinder; auf diesen schleift ein an der Unterseite der Kurbel angebrachter federnder Metallstreifen bei der Drehung der Kurbel. Bei der in der Figur angedeuteten Lage der Kurbel fliesst der Strom von a_1 direkt in die Kurbel, gelangt nach *b* etc.; alle Spiralen sind also ausgeschaltet — der Widerstand ist **kurz geschlossen.** Dreht man die Kurbel um einen Kontakt, berührt sie also a_2, so ist der Strom gezwungen, die Spirale s_1 zu durchfliessen. — Für die einzelnen Spiralen wählt man verschiedene Durchmesser, und zwar erhält s_1 den grössten und s_4 den kleinsten Querschnitt. Ist nämlich s_1 allein eingeschaltet, so ist der Strom selbstverständlich stärker, als wenn s_1 und s_2 eingeschaltet sind. Je grösser aber die Stromstärke ist, um so grösser muss der Querschnitt eines Leiters sein, wenn eine zu starke Erhitzung vermieden werden soll.

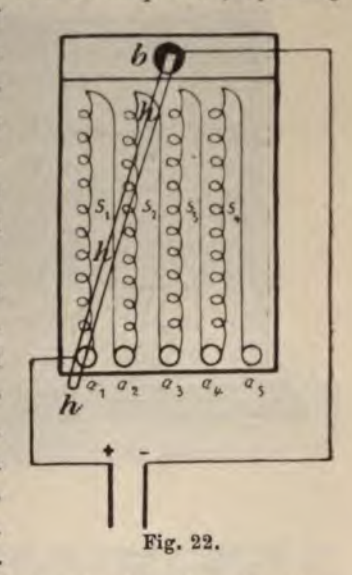


Fig. 22.

Meistens ist eine obere und eine untere Reihe von Spiralen vorhanden; diesen entsprechen zwei Reihen von Kontaktstücken.

Ein Kurbelrheostat für Demonstrations- und Messzwecke (Hartmann und Braun, Frankfurt a. M.) ist in Fig. 23 (S. 56) abgebildet. Er ist aus einem Schleifdrahtwiderstand und drei Kurbelrheostaten zusammengesetzt. Statt Drahtspiralen werden Drahtrollen benutzt, die auf der Rückseite des Apparates befestigt

sind. Die genannten Teile kann man entweder einzeln in verschiedenen Stromkreisen nach Loslösung der Verbindungsstücke $E_1 A_2$ bezw. $E_2 A_3$ oder in Hintereinanderschaltung benutzen. Der

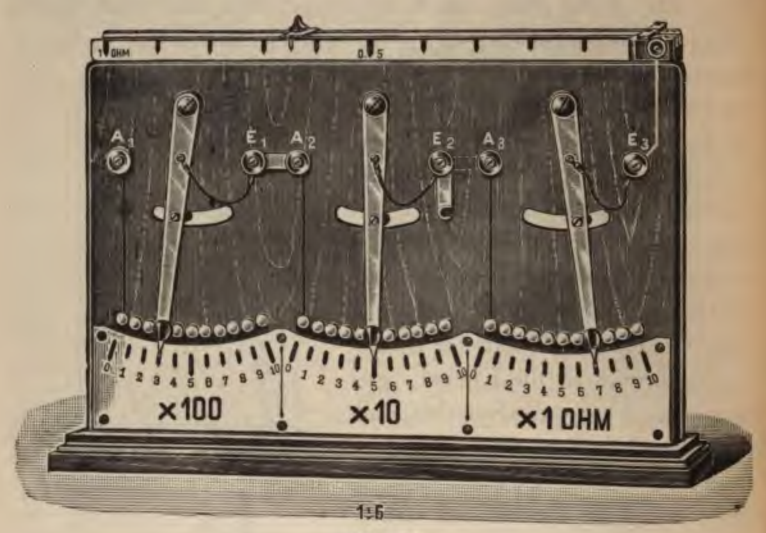


Fig. 23.

auf der oberen Kante des Apparates angebrachte gespannte Draht hat einen Widerstand von 1 Ohm und ist in Zehntelohm eingeteilt. Wenn man ihn benutzen will, so befestigt man einen Zuleitungsdraht an dem Schleifkontakte (in der Fig. oben). Die erste Dekade besteht aus 10 Widerständen à 1 Ohm, die zweite aus 10 Widerständen à 10 Ohm etc. Die Klemme E_3 steht durch eine Leitungsschnur mit der ersten Kurbel in Verbindung etc. Beim Gebrauche ist darauf zu achten, dass man die einzelnen Belastungsgrenzen nicht überschreitet. Diese beträgt bei der abgebildeten Type für den Schleifdrahtwiderstand 2,5 Amp., für die Einer 2 Amp., für die Zehner 0,8 Amp., für die Hunderter 0,2 Amp.

Der Stöpselrheostat (Siemens) besteht aus einem Kasten, auf dessen aus einer isolierenden Masse hergestelltem Deckel dicke, durch kleine Zwischenräume von einander getrennte Metallplatten *a*, *b*, *c* etc. (s. Fig. 24) befestigt sind. Die Platten haben bogenförmige Ausschnitte, in die konische Metallstöpsel mit Reibung eingesetzt werden können. Die letzte Platte der vorderen Reihe ist durch einen breiten (nahezu

widerstandslosen) Metallstreifen mit der zweiten Reihe verbunden. K_1 und K_2 sind Klemmschrauben zur Befestigung von Drähten.



Fig. 24.

Im Innern des Kastens befinden sich Spiralen aus Neusilberdraht; ihre Enden sind mit den Metallplatten in der durch die Fig. 25 veranschaulichten Weise verbunden. Der Widerstand einer jeden Spirale ist genau bestimmt und auf dem Deckel angeschrieben. Sind nun sämtliche Stöpsel fest eingesetzt, so fliesst der Strom, weil der Widerstand in den dicken Metallplatten und in den Stöpseln verschwindend klein ist (im Vergleich zu demjenigen in den einzelnen Spiralen), durch keine

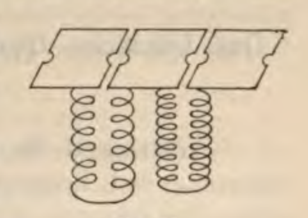


Fig. 25.

Drahtspirale (s. Stromverzweigung). Entfernt (zieht) man einen Stöpsel, z. B. den mit 8 bezeichneten, so ist der Strom gezwungen, durch die a_1 mit b_1 verbindende Spirale zu fliessen; es ist also ein Widerstand von 1 Ω eingeschaltet. Will man einen Widerstand von 6 Ω haben, so zieht man die Stöpsel

1 und 5. Sind alle Stöpsel entfernt, so ist der ganze eingeschaltete Widerstand gleich

$$1 + 2 + 2 + 5 + 10 + 10 + 20 + 50\ \Omega = 100\ \Omega.$$

Über Lampenwiderstände s. Akkumulatoren.

2) Flüssigkeitswiderstände verwendet man in der Technik hauptsächlich, wenn es sich um sehr starke Ströme handelt, und im Laboratorium, wenn man sehr grosse Widerstände nötig hat. Als Elektrolyt verwendet man im ersteren Falle meistens Sodalösung; die Elektroden bestehen aus Eisen. Die Regulierung erfolgt dadurch, dass man die Elektroden hebt bezw. senkt oder die Menge des Elektrolyten oder die Konzentration ändert. Von der Beschreibung einzelner Konstruktionen soll Abstand genommen werden.

Um sehr grosse Widerstände herzustellen, benutzt man meistens im Laboratorium eine ziemlich konzentrierte Lösung von Jodkadmium in Amylalkohol. Als Elektrode dient amalgamiertes Kadmium oder Kadmiumamalgam. Am einfachsten erhält man einen solchen Widerstand, wenn man eine U-förmige Glasröhre mit der genannten Lösung füllt und in jeden Schenkel einen Kadmiumdraht eintauchen lässt.

Viertes Kapitel.

Das Ohmsche Gesetz, Anwendungen desselben.

---

1. **Gültigkeit für den ganzen Stromkreis.** Der Formulierung und Besprechung des Ohmschen Gesetzes sollen einige Bemerkungen über die Bewegung der Elektrizität in einem Stromkreise vorausgeschickt werden, der aus einem galvanischen Elemente und Drähten gebildet ist. Das älteste und einfachste galvanische Element ist die Voltasche Kette; man erhält es, wenn man eine Zink- und eine Kupferplatte in verdünnte Schwefelsäure eintaucht (s. Fig. 26). Denken wir uns zunächst den die beiden Pole *a* und *c* verbindenden Draht *b*

entfernt. Wir haben dann eine offene Stromquelle. Das Kupfer ist, wie man nachweisen kann, positiv, das Zink negativ elektrisch; es besteht also zwischen *a* und *b* eine Potentialdifferenz. Drückt man diese in Volt aus, so erhält man die elektromotorische Kraft in Volt. Werden also die beiden Pole durch einen Draht — Schliessungsdraht — miteinander verbunden, so fliesst positive Elektrizität vom Kupfer zum Zink (Pfeil) und negative Elektrizität im entgegengesetzten Sinne. Die Richtung, in der die positive Elektrizität durch die äussere Leitung fliesst, wird als **Stromrichtung** bezeichnet.

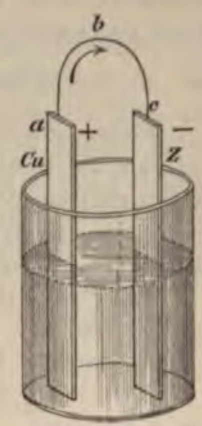


Fig. 26.

Wir betrachten von jetzt an nur die Bewegung der positiven Elektrizität. Die auf der Zinkelektrode ankommende positive Elektrizität wird — so wollen wir einstweilen annehmen — durch die elektromotorische Kraft durch die Flüssigkeit zum Kupfer zurückgetrieben; auf diese Weise wird die Potentialdifferenz wieder hergestellt. Die Elektrizität fliesst also nicht nur durch den Schliessungsdraht *b*, sondern auch durch die Substanzen des Elementes hindurch; sie hat nicht nur in der äusseren Leitung, sondern auch im Elemente selbst Widerstand zu überwinden. Man unterscheidet demgemäss zwischen dem **inneren** und **äusseren Widerstand** (w_i und w_a). Es ist also

der gesamte Widerstand $w = w_a + w_i$.

Das als Beispiel gewählte galvanische Element ist für die folgenden Betrachtungen wenig geeignet; wenn es nämlich Strom abgibt, so ändert sich seine (wirksame) elektromotorische Kraft (s. Polarisation). Wir werden später sehen, dass es Stromquellen gibt, deren elektromotorische Kraft man — wenigstens für einige Zeit — als konstant ansehen kann; eine solche möge jetzt an die Stelle der Voltaschen Kette treten.

Wie Ohm nachgewiesen hat, hängt die Stärke des Stromes, den eine Stromquelle liefert, von ihrer elektro-

motorischen Kraft und dem gesamten Widerstand ab, und zwar ist die Stromstärke proportional der elektromotorischen Kraft und umgekehrt proportional dem gesamten Widerstande:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektrom. Kraft}}{\text{ges. Widerstand}}.$$

Diese einfache Gestalt hat aber das Ohmsche Gesetz, das man als das Fundamentalgesetz der Lehre von der fliessenden Elektrizität bezeichnen muss, nur dann, wenn man die elektromotorische Kraft etc. in den eingeführten Einheiten (Volt, Amp., Ohm) ausdrückt.

Ohms erste bedeutende Arbeit erschien 1825 in Schweiggers Journal (Bd. 44), sein zusammenfassendes Werk 1827, betitelt: „Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet".

Man kann das Ohmsche Gesetz, dem man gewöhnlich die Form gibt

$$J = \frac{E}{W},$$

benutzen, um nach Festlegung von zwei Maßeinheiten die dritte zu definieren. Gewöhnlich verfährt man in der Weise, dass man zuerst die Begriffe Ampere und Ohm erklärt und dann 1 Volt definiert: Die elektromotorische Kraft einer Stromquelle ist gleich 1 Volt, wenn durch sie bei einem Gesamtwiderstand von 1 Ohm ein Strom von 1 Ampere verursacht wird. Die gegenseitige Abhängigkeit der drei Maßeinheiten wird durch die Gedächtnisregel

$$\text{Amp.} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}$$

ausgedrückt.

Versuche über das Ohmsche Gesetz: Benutzt man als Stromquelle einen Akkumulator, so kann man den inneren Widerstand vernachlässigen. Als äusseren veränderlichen Widerstand kann man den Seite 56 beschriebenen Kurbelrheostat benutzen. Als Zuleitungsdrähte wählt man möglichst kurze und dicke Kupferdrähte, damit man deren Widerstand vernachlässigen kann. — Die elektromotorische Kraft erhält man hinreichend genau, wenn man die Pole des Akkumulators mit einem Voltmeter verbindet. — Zu beachten ist, dass viele „empfindliche" Amperemeter einen relativ grossen Widerstand haben.

Will man zeigen, dass der innere Widerstand eine Rolle spielt, so benutze man ein Daniell-Element. Dadurch, dass man die Elektroden hebt bezw. senkt, kann man den inneren Widerstand variieren.

2. **Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes für einen beliebigen Teil des Stromkreises — Spannungsverlust.** Es möge, um die Betrachtungen an einen bestimmten Fall anzulehnen, die Potentialdifferenz zwischen den beiden Polen einer Stromquelle 60 Volt betragen, und zwar sei das Potential des einen Pols + 30 Volt und das des anderen — 30 Volt [1]). Wir denken uns die beiden Klemmen durch einen Draht, der überall denselben Querschnitt hat (s. Fig. 27), miteinander verbunden und diesen Draht durch Marken in 6 gleiche Stücke geteilt. Das Potential fällt in der Leitung von dem Betrage + 30 Volt auf den Betrag — 30 Volt und sinkt offenbar in dem Teile *ab* um denselben Betrag wie in *bc* etc. In *a* hat es den Betrag + 20 Volt etc. Es besteht also zwischen zwei beliebigen Stellen des Drahtes eine Potentialdifferenz, diese kann man messen, wenn man die beiden Punkte durch Drähte mit einem Voltmeter verbindet. Die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises bezeichnet man als Spannungsverlust (Spannungsabnahme). Man kann nun nachweisen, dass die



Fig. 27.

Spannung (Potentialdifferenz) an den Enden eines Leiterstückes = Stromstärke × Widerstand des Leiterstückes,

oder dass $e = i \cdot w$.

1) Die erste Annahme hat die zweite nicht zur Folge. Es kann z. B. der eine Pol einer Stromquelle das Potential + 40 Volt und der andere das Potential — 20 Volt haben.

Schreiben wir unsere Gleichung in der Form

$$i = \frac{e}{w},$$

so hat sie dieselbe Gestalt wie das Ohmsche Gesetz.

Denken wir uns eine Glühlampe, deren Widerstand 118 Ohm betragen möge, durch zwei Drähte von je 1 Ohm Widerstand mit den Polen unserer Stromquelle (60 Volt) verbunden. Es beträgt dann, wenn wir den inneren Widerstand der Stromquelle vernachlässigen dürfen, die Stromstärke $\frac{60}{120} =$ $^1/_2$ Ampere. Der Spannungsverlust in jedem der beiden Drähte hat also nach unserer obigen Gleichung den Wert $1 \cdot {}^1/_2$ Volt, so dass an den Klemmen der Lampe eine Spannung von 59 Volt herrscht, d. h. 1,7 $^0/_0$ weniger als an den Polen der Stromquelle. Wir werden später sehen, dass der Energieverlust in der Leitung, in Prozenten ausgedrückt, gleich dem prozentualen Spannungsverluste ist. In unserem Beispiele würde also der Energieverlust 1,7 $^0/_0$ betragen.

Bei der grossen Bedeutung, die der eben genannte Satz für die Elektrotechnik besitzt, soll eine zwar nicht ganz exakte, aber doch wohl hinreichend genaue Resultate liefernde Versuchsanordnung beschrieben werden, mittels deren man die Richtigkeit der Gleichung $e = i \cdot w$ demonstrieren kann. Es sei *acb* (Fig. 28) ein horizontal gespannter Draht von 1 bis 2 Ohm Widerstand,

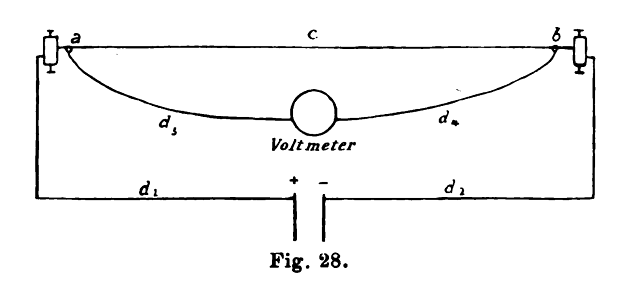


Fig. 28.

etwa ein blank geriebener Eisendraht. Dieser ist mittels der Zuleit[illegible]rähte d_1 und d_2 mit einer Stromquelle von etwa 4 Volt ([illegible]toren) verbunden. Die zum Voltmeter für schwache [illegible]nd mit grösserem inneren Widerstande — damit man [illegible] Voltmeter fliessenden Strom unberücksichtigt lassen

kann — führenden Drähte d_3 und d_4 sind an Gleitkontakten befestigt. Wir können so die Spannung (Potentialdifferenz) zwischen zwei beliebigen Punkten des Leiters *ab* messen. Zunächst kann man zeigen, dass e proportional w ist. Verschiebt man z. B. den Gleitkontakt bei *b* bis zur Mitte des Drahtes, so sinkt die Spannung um die Hälfte. Will man auch i variieren, also die Abhängigkeit des Spannungsverlustes von der Stromstärke prüfen, so muss man in die Hauptleitung d_1 oder d_2 einen Kurbelrheostaten und ein Amperemeter für schwache Ströme einschalten. Bei einer bestimmten Entfernung zwischen den Gleitkontakten steigt und sinkt die Spannung mit der Stromstärke. — Bei exakten Versuchen müsste der Leiter gekühlt werden, weil sich bei Änderung der Stromstärke die Temperatur und mit dieser der Widerstand des Drahtes ändert. Zu dem Zwecke müsste man den geradlinigen Draht in Spiralen zerlegen, diese in Alkohol oder Öl tauchen und ihre Enden an Klemmen befestigen.

Eine praktische Anwendung der Formel $e = i \cdot w$ soll an der Hand einer Aufgabe erläutert werden. Die elektromotorische Kraft[1]) einer Dynamomaschine betrage 120 Volt; es sollen an einem 200 m weit entfernten Orte 80 Amp. bei 110 Volt Nutzspannung (= Spannung an den entfernten Enden der Leitung) zur Verfügung stehen; welchen Querschnitt muss man den Leitungsdrähten aus Kupfer, dessen spezifischer Widerstand 0,017 sei, geben? Der Spannungsverlust in der Leitung darf 10 Volt betragen; bezeichnen wir also den Widerstand in der Leitung (Hin- und Rückleitung) mit w, so ist

$$10 = 80\,w, \text{ mithin } w = \frac{1}{8} \text{ Ohm.}$$

Nennen wir den Querschnitt der Leitung q, so ist

$$w = \frac{400 \cdot 0{,}017}{q} = \frac{1}{8} \text{ und}$$

$$q = 8 \cdot 400 \cdot 0{,}017 = 54{,}4 \text{ mm}^2.$$

3. Elektromotorische Kraft und Klemmenspannung.

Wie wir gesehen haben, fliesst der elektrische Strom nicht nur durch den äusseren Stromkreis (Nutzleitung), sondern auch durch das Innere einer Stromquelle hindurch und muss dort Widerstand überwinden. Diesem Widerstande entspricht ebenfalls ein Spannungsverlust, den man den Ohmschen Spannungsabfall in der Stromquelle nennt. [Hierhin gehört also nicht die Schwächung der elektromotorischen Kraft infolge der

1) Streng genommen müssten wir hier sagen „die Klemmenspannung“.

Polarisation, infolge der Ankerrückwirkung etc.] Bezeichnen wir wie früher den inneren Widerstand mit w_i und den von der Stromquelle abgegebenen Strom mit J, so beträgt der Spannungsverlust in der Stromquelle $w_i . J$ Volt. Um diesen Betrag ist die Potentialdifferenz der Klemmen, die Klemmenspannung, kleiner als die elektromotorische Kraft E.

Klemmenspannung $(e) = E - w_i . J$.

Da Anfang und Ende des äusseren Stromkreises mit den Klemmen zusammenfallen, so ist offenbar der Spannungsverlust in dem ganzen äusseren Stromkreise identisch mit der Klemmenspannung; mithin ist diese durch das Produkt $w_a . J$ gegeben. Setzt man dies in die Gleichung

$$E = e + w_i . J$$

ein, so erhält man

$$E = w_a . J + w_i . J = (w_a + w_i) . J = W . J;$$

dies ist aber das Ohmsche Gesetz, bezogen auf den ganzen Stromkreis.

Mittels eines Voltmeters, das mit den Polen einer Stromquelle verbunden ist, messen wir die Klemmenspannung (streng genommen nie die elektromotorische Kraft). Ist nun die Stromquelle nur mit dem Voltmeter verbunden, und hat dieses — wie es sein sollte — einen relativ grossen Widerstand[1]), so ist J (relativ) sehr klein, und man kann dann das Produkt $w_i . J$, besonders wenn w_i nicht gross ist, vernachlässigen, d. h. die gemessene Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft setzen. Wird die Stromquelle belastet, so wird der Unterschied zwischen E und e um so grösser, je mehr Strom in die Nutzleitung fliesst.

Als Beispiel wählen wir eine Thermosäule. Die Klemmen seien zunächst nur mit einem Voltmeter von 100 Ohm Widerstand verbunden; es kommt ein Strom von etwa 0,035 Amp. zustande. Da der innere Widerstand zwischen 0,5 und 1 Ohm liegt, so kann man $w_i . J$ vernachlässigen und die vom Voltmeter angegebene Spannung, die 3,5 Volt betragen möge, als elektromotorische Kraft ansehen. Es werde ein zweiter Stromkreis hergestellt, bestehend aus einem Rheostaten und einem Amperemeter

1) Gross im Vergleich mit der zu messenden Spannung.

nebst den zugehörigen Verbindungsdrähten (cf. Fig. 142 auf S. 242). Man richte es so ein, dass ein Strom von 1 Amp. durch den Hauptstromkreis fliesst. Der gesamte Widerstand beträgt also nach dem Ohmschen Gesetze 3,5 Ohm; hiervon mögen 2,8 Ohm auf den äusseren Stromkreis kommen. w_i ist also gleich 3,5—2,8 = 0,7 Ohm. Das Voltmeter zeigt jetzt 2,8 Volt an. Steigert man den Strom bis zu 2 Amp., so beträgt die vom Voltmeter gemessene Klemmenspannung 3,5—2 . 0,7 = 2,1 Volt etc.

Die in einer Stromquelle in Wärme umgesetzte Energie ist, wie wir später sehen werden, der Spannungsabnahme in der Stromquelle proportional. Da nun die im Innern einer Stromquelle erzeugte Wärme für uns wertlos ist, so muss dafür gesorgt werden, dass der innere Widerstand einen möglichst oder relativ kleinen [1]) Betrag hat. Bei Dynamomaschinen kommt hinzu, dass bei starker Erwärmung die Isolation Schaden leiden kann.

4. Parallel- und Serienschaltung der Stromquellen. Stehen uns zwei Stromquellen zur Verfügung, und sollen beide Strom an dieselbe Leitung (denselben Apparat) abgeben, so können wir zwei verschiedene Schaltungen anwenden. Ehe wir diese behandeln, wollen wir eine das Verständnis fördernde Analogie zu Hülfe nehmen. In Fig. 29 sei P_1 eine Pumpe, durch die in jeder Sekunde 1 l Wasser 10 m hoch gehoben wird. Lassen wir das Wasser aus R_1 abfliessen und auf ein kleines Wasserrad fallen, so kann dieses (pro Sekunde) für uns, wenn wir von Verlusten absehen, eine Arbeit von 10 kgm leisten. Soll unter Zuhülfenahme einer zweiten Pumpe der Effekt (Arbeit in 1 Sekunde) verdoppelt werden, so kann

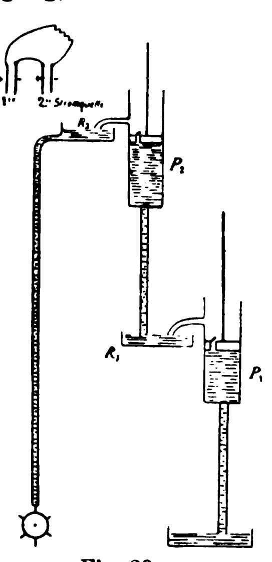


Fig. 29.

1) Es kommt darauf an, dass das Produkt $w_i . J$ in jedem einzelnen Falle im Verhältnis zur elektromotorischen Kraft nicht zu gross ist.

das auf zwei verschiedenen Wegen erreicht werden. Wir können nämlich entweder das von der Pumpe P_1 gehobene Wasser mittels der Pumpe P_2 nochmals um 10 m heben, d. h. das Gefälle verdoppeln (s. Fig. 29) oder die zweite Pumpe neben der ersten aufstellen — etwa links neben P_1 — d. h. die Stromstärke verdoppeln. Im ersteren Falle sind die Pumpen hintereinander (in Reihe, in Serie), im letzteren parallel geschaltet.

Ähnlich können wir bei unseren beiden Stromquellen verfahren. Diese mögen zwei Elemente derselben Art und derselben Grösse sein, etwa zwei Akkumulatoren. Verbindet man die beiden positiven Pole miteinander und ebenso die beiden negativen, so kann man die Anordnung als einen einzigen Akkumulator ansehen. Die äussere Leitung kann mit einem beliebigen Punkte des positiven Drahtes und einem beliebigen Punkte des negativen Drahtes verbunden werden. Misst man mittels eines Voltmeters die elektromotorische Kraft der Kombination, so findet man, dass sie gerade so gross ist wie diejenige eines der beiden Elemente. Gehen durch den äusseren Stromkreis J Amp., so gibt jedes Element $\frac{J}{2}$ Amp. ab.

Um die Elemente hintereinander (auf Spannung) zu schalten, verbindet man den negativen Pol des ersten Elementes mit dem positiven des zweiten und legt an die noch freien Pole die äussere Leitung (Serienschaltung). Ein mit den Polen der Batterie verbundenes Voltmeter zeigt eine elektromotorische Kraft an, die doppelt so gross ist wie diejenige eines Elementes.

Mit vier Elementen kann man vier verschiedene Schaltungen vornehmen, jedoch kommen für die Praxis nur drei derselben in Betracht. Diese sind in den Figuren 30 bis 32 schematisch dargestellt, in denen die punktierten Linien dem äusseren Stromkreise entsprechen. Bei der ersten Schaltung sind alle vier Elemente hintereinander, bei der zweiten parallel geschaltet; bei der dritten Kombination sind je zwei Elemente durch Nebeneinanderschaltung zu einem Doppelelemente verbunden und die Doppelelemente in Serie geschaltet. Wir wollen uns nun kurz mit der Frage beschäftigen, welche

Schaltung man in einem gegebenen Falle zu wählen hat. Meistens will man in der äusseren Leitung einen Strom von bestimmter Stärke haben, oft aber handelt es sich darum, mit

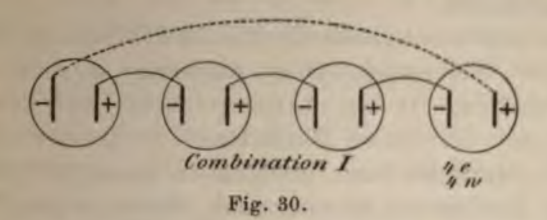


Fig. 30.

den zur Verfügung stehenden Mitteln einen möglichst starken Strom zu erzeugen. Bei der Wahl der Schaltung spielt nun keineswegs immer der Widerstand im ganzen Stromkreise

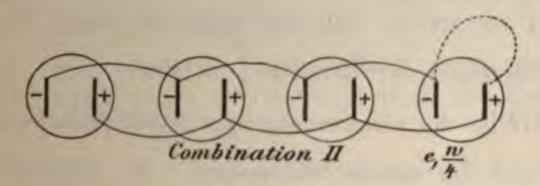


Fig. 31.

allein eine ausschlaggebende Rolle; man muss vielmehr sehr oft, bei Dynamomaschinen und Akkumulatoren fast immer, auf die Stromquelle selbst Rücksicht nehmen, indem man nämlich eine gewisse Stromstärke nicht überschreiten darf (s. Akkumulatoren). Z. B. genügt für manche Versuche e i n Akkumulator, um den nötigen Strom zu erzeugen. Wenn dieser Strom aber grösser ist als der maximale Strom, den man dem vorhandenen Akkumulator entnehmen darf, so wird man die Parallelschaltung von zwei oder mehreren Akkumulatoren vornehmen müssen.

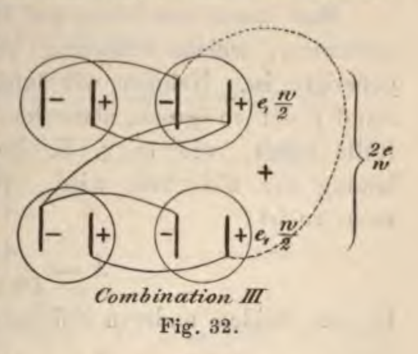


Fig. 32.

Unter der Annahme, dass es sich darum handelt, im äusseren Stromkreise einen Strom von möglichst grosser Intensität zu erzeugen, wollen wir die drei Kombinationen kurz besprechen.

Die elektromotorische Kraft eines Elementes sei e Volt, der innere Widerstand eines Elementes w Ohm. Bei der ersten Schaltung ist die elektromotorische Kraft der Batterie 4 e Volt und der innere Widerstand, da der Strom die vier Elemente der Reihe nach durchfliessen muss, 4 w Ohm.

Die Kombination *II* entspricht offenbar einem Elemente, dessen Polplatten viermal so gross sind wie bei einem der gegebenen Elemente. Da aber der innere Widerstand einer Kette von der Grösse (natürlich auch von dem Abstande) der Elektroden abhängig, und zwar dieser umgekehrt proportional ist, so beträgt bei der Schaltung nach Fig. 31 der innere Widerstand der Batterie $\frac{1}{4}$ w Ohm.

Bei *III* ist die elektromotorische Kraft des oberen Paares gleich e und der innere Widerstand $\frac{1}{2}$ w; dasselbe gilt für das untere Paar. Da nun die beiden Doppelelemente hintereinander geschaltet sind, so beträgt die zur Verfügung stehende Spannung 2 e Volt und der vom Strome zu überwindende innere Widerstand w Ohm.

Man kann nun leicht mit Hülfe des Ohmschen Gesetzes berechnen, welche Schaltung in einem gegebenen Falle die günstigte ist. Nehmen wir zunächst an, der äussere Widerstand r sei so gross, dass im Vergleich zu ihm 4 w keine Rolle spielt, wie es z. B. bei einer langen Telegraphenleitung der Fall sein wird. Wählt man die erste Schaltung, so ist

$$J = \frac{4e}{4w + r};$$

für die beiden anderen Schaltungen gelten die Gleichungen

$$J = \frac{e}{\frac{w}{4} + r} \text{ und } J = \frac{2e}{w + r}.$$

Bei der gemachten Annahme spielen die Summanden 4 w, $\frac{w}{4}$ und w in den Nennern nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu r. Lässt man sie also weg, so erhält man für die Stromstärken Näherungswerte:

$$\text{I } J = 4\frac{e}{r}, \text{ II } J = \frac{e}{r}, \text{ III } J = 2\frac{e}{r}.$$

Also ist die Kombination I die günstigste.

Zahlenbeispiel: Es sei $r = 60\,\Omega$, $w = 0{,}6\,\Omega$. Für ein Element ist $J_1 = \frac{e}{60 + 0{,}6} = 0{,}0165\,e$. Sind vier Elemente (derselben Art und Grösse) hintereinander geschaltet, so ist $J = \frac{4\,e}{60 + 4 \,.\, 0{,}6} = 0{,}064 \,.\, e$, also fast gleich $4 \,.\, J_1$.

Seltener ist der Fall, dass r im Vergleich zu w sehr klein ist: Man erhält dann Näherungswerte für die den drei Kombinationen entsprechenden Stromstärken, wenn man in den Nennern r vernachlässigt, und findet, dass die Parallelschaltung (Fig. 31) zu bevorzugen ist.

Trifft keiner der beiden behandelten Fälle zu, so liefern die Elemente, wie man mathematisch nachweisen kann, den stärksten Strom (Maximalstrom), wenn sie so geschaltet werden, dass der Widerstand der ganzen Batterie gleich ist dem äusseren Widerstande.

Zahlenbeispiel: $r = 2\,\Omega$, $w = 0{,}5\,\Omega$, $n = 4$.

Für ein Element ist $J_1 = \frac{e}{2{,}5} = 0{,}4 \,.\, e$.

„ die Kombination I ist $J = \frac{4\,e}{4 \,.\, 0{,}5 + 2} = 1 \,.\, e = 2^1/_2\, J_1$.

„ „ „ II ist $J = \frac{e}{\frac{0{,}5}{4} + 2} = \frac{e}{2{,}125} = 0{,}47\,e$.

„ „ „ III ist $J = \frac{2\,e}{2 \,.\, \frac{0{,}5}{2} + 2} = \frac{2}{2{,}5}\,e = 0{,}8\,e = 2 \,.\, J_1$.

Wie man sieht, ist die Schaltung I die günstigste; bei dieser aber ist der innere Widerstand gleich $4 \,.\, 0{,}5\,\Omega = 2\,\Omega$ oder gleich r.

Fünftes Kapitel.

Stromverzweigungen, Parallel- und Serienschaltung der Stromabnehmer.

1. **Einfache Stromverzweigung.** Ein elektrischer Strom fliesse von einer Stromquelle, deren Pole in Fig. 33 mit *P* und *P'* bezeichnet sind, durch einen Draht nach *a*, dort verzweige sich die Leitung; dann fliesst ein Teil des Stromes durch den „Zweig" *a c b*, der Rest durch *a d b*; bei *b* vereinigen sich die beiden Ströme wieder.

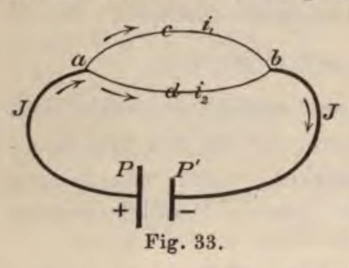


Fig. 33.

1) Offenbar ist jetzt nicht mehr die Stromstärke im ganzen Kreise die gleiche; der Strom in den Zweigen ist vielmehr kleiner als derjenige in *Pa* und *P'b*. Bezeichnen wir mit *J* die Stromstärke in *Pa* bezw. *P'b*, die Ströme in *acb* und *adb* mit i_1 und i_2, so ist $J = i_1 + i_2$.

Durch Einschaltung von drei Amperemetern kann man die Richtigkeit dieser Gleichung nachweisen.

2) Es fragt sich, in welchem Verhältnisse i_1 und i_2 zueinander stehen. Bezeichnen wir die Potentialdifferenz der Punkte *a* und *b* mit *e*, so können wir *e* als die die Elektrizität durch jeden Zweig treibende Kraft ansehen, oder, anders ausgedrückt, das Potential sinkt in jedem der beiden Zweige um *e* Volt. Nun ist aber der Spannungsverlust in einem Leiter gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstande. Ist also der Widerstand in *acb* gleich w_1 und in *adb* gleich w_2, so ist

$$e = i_1 . w_1 \text{ und } e = i_2 . w_2. \quad \text{Mithin}$$

$$i_1 . w_1 = i_2 . w_2 \text{ oder } i_1 : i_2 = w_2 : w_1, \text{ d. h.}$$

die Stromstärken in den beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände. Ist z. B. der Leitungswiderstand in *acb* doppelt so gross wie in *adb*, so ist $i_2 = 2\,i_1$ und $i_1 = \frac{J}{3}$.

Die abgeleitete Proportion geht, wenn man das zweite Verhältnis durch $w_1 . w_2$ dividiert, in die folgende über:

$$i_1 : i_2 = \frac{1}{w_1} : \frac{1}{w_2},$$

d. h. die Stromstärken verhalten sich wie die reziproken Werte der betreffenden Widerstände.

Sind *a* und *b* durch drei Drähte mit den Widerständen w_1, w_2, w_3 miteinander verbunden, so ist

$$i_1 : i_2 : i_3 = \frac{1}{w_1} : \frac{1}{w_2} : \frac{1}{w_3}.$$

3) Von praktischer Bedeutung ist die Frage, durch welchen einfachen Widerstand man statt der Zweige die Punkte *a* und *b* verbinden muss, wenn der Hauptstrom *J* seine vorige Stärke (J Amp.) beibehalten oder wenn die Spannung zwischen *a* und *b* dieselbe bleiben soll. Da

$$J = i_1 + i_2 \text{ und } i_1 = \frac{e}{w_1},\ i_2 = \frac{e}{w_2}, \text{ so ist}$$

$$J = e\left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2}\right).$$

Denken wir uns die beiden Zweige entfernt und statt dessen den zu berechnenden Widerstand x zwischen *a* und *b* geschaltet, so soll x eine solche Grösse haben, dass

$$J = \frac{e}{x};$$

mithin ist x durch die Gleichung bestimmt

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} = \frac{w_1 + w_2}{w_1 . w_2}.$$

Sind drei Zweige vorhanden, so ist

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3} \text{ etc.}$$

x nennt man auch wohl den kombinierten Widerstand der Stromverzweigung. Man sieht leicht ein, dass x kleiner ist als jeder einzelne Teilwiderstand.

Es sei z. B. $w_1 = 2$ Ohm, $w_2 = 3$ Ohm; dann ist $x = \frac{2 \cdot 3}{2 + 3} = \frac{6}{5}$ Ohm.

Die Leiter *acb* und *adb* in Fig. 33 sind parallel oder nebeneinander geschaltet. Bei der Parallelschaltung findet also eine Teilung des Stromes statt. Natürlich kann diese Teilung schon an den Klemmen der Stromquelle beginnen bezw. dort enden.

Wenn man den Widerstand in einer Leitung verringern will, so kann man, statt einen Draht von grösserem Querschnitt zu spannen, mehrere dünnere Drähte parallel schalten. Dieser Satz ist für die Praxis von grosser Wichtigkeit.

2. **Brückenverzweigung, Messung von Widerständen.** Von komplizierteren Stromverzweigungen soll nur noch die in der Messtechnik und der Telegraphie viel benutzte Brückenverzweigung oder Wheatstonesche Brücke behandelt werden. Zwei beliebige Punkte der Zweige *acb* und *adb* in Fig. 34 seien durch einen Leiter *cd* miteinander verbunden. Es wird dann bei *c* eine neue Stromverzweigung stattfinden. Man kann jedoch die Punkte *c* und *d* so wählen, dass durch die Diagonale *cd* kein Strom fliesst; es fragt sich nun, unter welchen Bedingungen das der Fall ist. Damit man erkennen kann, ob durch die Diagonale *cd* ein Strom fliesst oder nicht, sei in sie ein Galvanoskop *G* eingeschaltet. Die Widerstände *ac*, *cb*, *ad*, *db*, seien mit w_1, w_2, w_3, w_4 bezeichnet und die betreffenden Stromstärken mit i_1 bis i_4. Soll nun durch *cd* keine Elektrizität hindurch gehen, so muss

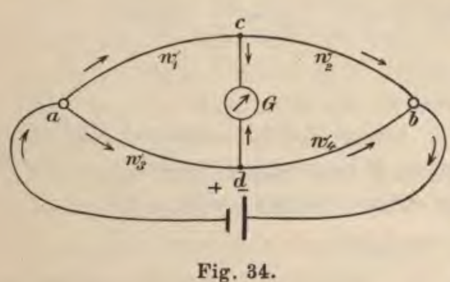


Fig. 34.

$$i_1 = i_2 \text{ und } i_3 = i_4 \text{ sein.}$$

Ferner kann die Diagonale *cd* nur dann stromlos sein, wenn in *c* dasselbe Potential herrscht wie in *d*. Dies ist der Fall,

wenn das Potentialgefälle (Spannungsabnahme) in *ac* gleich ist dem Potentialgefälle in *ad*, und demgemäss auch die Spannungsabnahme in *cb* = der Spannungsabnahme in *db*.

Nun ist das Potentialgefälle in a c $= i_1 . w_1$ und in a d $= i_3 . w_3$,
" " " c b $= i_2 . w_2$ " " d b $= i_4 . w_4$.

Daher müssen die Beziehungen gelten

$$i_1 . w_1 = i_3 . w_3 \text{ und}$$
$$i_2 . w_2 = i_4 . w_4,$$
oder, da $i_1 = i_2$ und $i_3 = i_4$,
$$i_1 . w_1 = i_3 . w_3 \text{ und}$$
$$i_1 . w_2 = i_3 . w_4.$$

Dividiert man diese beiden Gleichungen durcheinander, so ergibt sich:

$$w_1 : w_2 = w_3 : w_4 \text{ oder } w_1 . w_4 = w_2 . w_3.$$

(Es sei an den bekannten Satz über das Sehnenviereck erinnert.)

Diese Bedingung muss also erfüllt sein, wenn durch die Diagonale *cd* kein Strom fliessen soll, und umgekehrt, wenn diese Bedingung erfüllt ist, so ist *cd* stromlos.

Um mittels der Brückenschaltung einen unbekannten Widerstand zu messen, kann man folgendes Verfahren anwenden: Ein Messdraht von Konstantan (Nickelin o. dgl.) von 1 m Länge ist zwischen zwei Metallplatten mit je zwei Klemmschrauben gespannt (s. Fig. 36; in der schematischen Fig. 35 ist dieser Draht mit *AB* bezeichnet). Je eine Klemme am linken und rechten Ende des Messdrahtes verbinde man mit den beiden Polen einer Stromquelle (von 1—2 Akkumulatoren[1]); an die beiden anderen Klemmen lege man je ein Ende des zu messenden Widerstandes *X* und eines bekannten (Vergleichs)-Widerstandes w_1; die beiden anderen Enden von w_1 und *X* sind bei *C* miteinander verbunden. Das Galvanoskop *G* wird einerseits mit *C*, anderseits mit dem Schleifkontakt *D* verbunden. Ist der Messdraht homogen, und hat er überall denselben Querschnitt, so ist das Verhältnis

1) Damit der Messdraht nicht zu stark erwärmt wird, schalte man zwischen ihn und die Batterie einen Kurbelrheostaten.

der Widerstände in den Drahtstücken *AD* und *DB* durch das Verhältnis der Drahtlängen, die man auf einer Skala ablesen

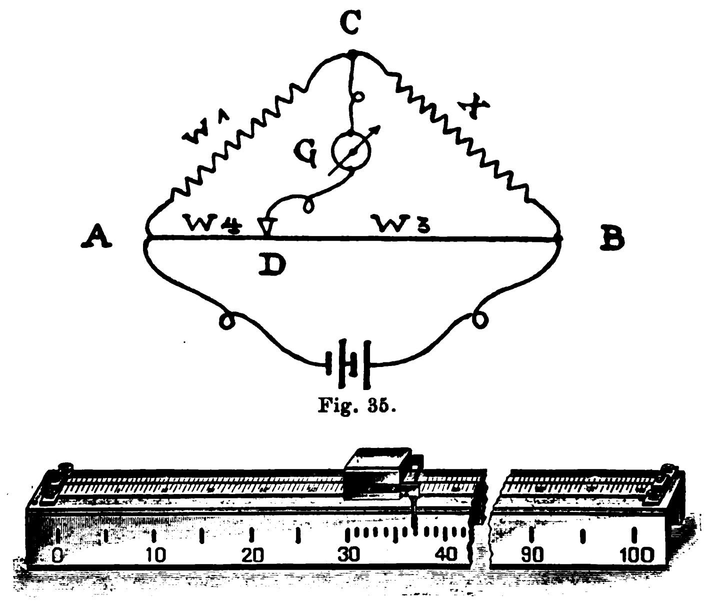


Fig. 35.

Fig. 36.

kann, gegeben. Ist z. B. $AD = 30$ cm und $DB = 70$ cm, so ist $w_4 : w_3 = \frac{30}{70} = \frac{3}{7}$.

Dem Verhältnisse $w_4 : w_3$ kann man durch Verschieben des Schleifkontaktes jeden beliebigen Wert geben; befindet sich *D* nämlich sehr nahe bei *A*, so ist $\frac{w_4}{w_3}$ sehr klein; fällt aber *D* nahezu mit *B* zusammen, so ist in dem Bruche der Nenner sehr klein, der Bruch also sehr gross. Bei einer gewissen Lage des Schleifkontaktes wird daher $\frac{w_4}{w_3}$ den Wert $\frac{w_1}{x}$ haben (d. h. durch das Galvanoskop kein Strom fliessen). Da nun w_1 bekannt ist, so kann man x finden.

Je empfindlicher das Galvanoskop ist, um so genauer kann man $w_4 : w_3$ bestimmen, um so genauer wird die Messung.

Der Vergleichswiderstand w_1 sollte seiner Grösse nach nicht zu sehr von dem zu messenden Widerstande verschieden sein, weil sonst durch kleine Ablesungsfehler das Resultat stark beeinträchtigt wird.

Vertauscht man in der Brückenvorrichtung Galvanoskop und Messbatterie miteinander, so gilt dieselbe Gleichgewichtsbedingung wie eben.

3. **Die Serien- und Parallelschaltung von Lampen und Motoren etc.** Wenn man mehreren Lampen, Motoren oder Apparaten aus derselben Stromquelle Elektrizität zuführen will, so kann man zwei verschiedene Schaltungen anwenden. Bei der Hintereinanderschaltung, die für drei Lampen durch die Fig. 37 veranschaulicht wird, durchfliesst der ganze Strom der Reihe nach die Lampen L_1, L_2, L_3. Bei dieser Anordnung ist jede Lampe von den anderen abhängig; wird also eine Lampe, z. B. L_1, ausgeschaltet oder brennt ihr Faden durch, so wird die ganze Leitung stromlos, und alle Lampen erlöschen.

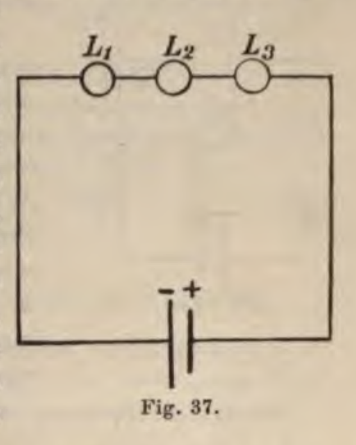


Fig. 37.

Nehmen wir an, die Klemmenspannung der Stromquelle betrage 330 Volt und der Widerstand in jeder Lampe 220 Ω; dann ist der Widerstand im äusseren Stromkreise gleich 660 Ω, wenn, wie in der Figur angenommen wurde, drei Lampen brennen und der Widerstand in den Leitungsdrähten vernachlässigt werden darf. Mithin ist der Strom $\frac{330}{660} = {}^1/_2$ Amp. stark. In jeder Lampe beträgt der Spannungsverlust $\frac{1}{2} . 220 = 110$ Volt. Man kann daher sagen, dass bei der Reihenschaltung die Spannung geteilt wird. Hätten die Lampen ungleiche Widerstände, so würde sich die Klemmenspannung auf die einzelnen Lampen im Verhältnisse ihrer Widerstände verteilen.

Die reine Serienschaltung wird wegen des eben erwähnten Übelstandes (gegenseitige Abhängigkeit) in der Praxis

seltener angewandt, obschon sie vor der gleich zu besprechenden Parallelschaltung einen grossen Vorzug hat. Da nämlich ein und derselbe Strom alle Lampen etc. durchfliesst, so hat der in der Leitung zirkulierende Strom eine verhältnismässig geringe Stärke. Infolgedessen kann man ohne grossen Kupferaufwand die Verluste in der Leitung (s. Joulesche Wärme) auf einen geringen Prozentsatz reduzieren.

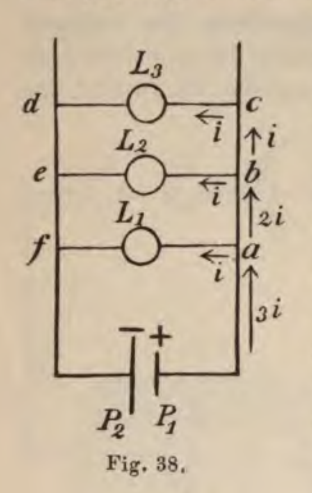


Fig. 38.

In Fig. 38 sind drei Lampen parallel geschaltet. Der Widerstand in den Leitungsdrähten werde zunächst vernachlässigt, und es mögen wieder die drei Lampen gleichen Widerstand haben. Der von der Stromquelle abgegebene Strom, den wir gleich 3 i setzen, teilt sich bei *a*, eine zweite Teilung findet bei *b* statt. Wir haben also eine zweimalige Stromverzweigung vor uns.

Beträgt die Spannung zwischen *a* und *f* e Volt, so fliesst durch L_1 ein Strom von $i = \frac{e}{w}$ Amp. (w Widerstand in einer Lampe). Die Spannung *e* treibt aber auch die Elektrizität durch den Kreis *abef*. Nach den gemachten Annahmen ist aber auch in diesem Kreise der Widerstand w Ohm, so dass durch L_2 ein Strom von $\frac{e}{w}$, d. h. von i Amp. getrieben wird; dasselbe gilt von dem dritten Kreise *acdf*.

Man kann auch folgendermaßen schliessen: Die drei Lampen können wir uns durch einen einzigen Widerstand x ersetzt denken, der, wie früher gezeigt wurde, durch die Gleichung bestimmt ist:

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{w} + \frac{1}{w} + \frac{1}{w} = \frac{3}{w}.$$

$$\text{Mithin } x = \frac{w}{3} \text{ und}$$

$$J = e : \frac{w}{3} = 3 \cdot \frac{e}{w}.$$

Da die Zweigwiderstände einander gleich sind, so fliesst durch jede Lampe ein Drittel des Gesamtstromes J.

Wir hatten angenommen, dass man den Widerstand in den Zuleitungsdrähten (*ab*, *bc*, *de*, *ef*) vernachlässigen kann. Bei ausgedehnten elektrischen Anlagen ist diese Annahme keineswegs gestattet; daher sind die durch die einzelnen Lampen fliessenden Ströme nicht einander gleich. Je weiter eine Lampe bei der durch unsere Figur angedeuteten Stromverteilung von der Stromquelle entfernt ist, desto schwächer ist der durch sie fliessende Strom.

Der Einfluss des Widerstandes in den Leitungsdrähten soll durch ein Beispiel erläutert werden. Die Klemmenspannung der Dynamo betrage 100 Volt, der Widerstand in jeder Lampe 50 Ω, der Widerstand bis zur ersten Lampe (in $P_1 a$ und $P_2 f$) sei 1 Ω, bis zur zweiten (in $P_1 b + P_2 e$) 2 Ω, bis zur dritten 3 Ω. Bezeichnen wir mit x den Widerstand, den wir statt *be* und *bcde* zwischen *b* und *e* einschalten können, so ist

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{50} + \frac{1}{51} = 0{,}0396, \quad x = 25{,}3\ \Omega \text{ (angenähert)}.$$

Jetzt haben wir noch eine einfache Stromverzweigung vor uns, die bei *a* beginnt und bei *f* endigt. Den kombinierten Widerstand y findet man aus der Gleichung:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{50} + \frac{1}{26{,}3} = 0{,}058, \quad y = 17{,}3\ \Omega.$$

Der Gesamtwiderstand in dem äusseren Stromkreise ist also:

$$w = 1 + 17{,}3 = 18{,}3\ \Omega.$$

Mithin J = 100 : 18,3 = 5,5 Amp.

Der Spannungsverlust (Stromstärke $\times$ Widerstand) in $P_1 a$ und $P_2 f$ beläuft sich auf 1 . 5,5 = 5,5 Volt, so dass ein mit *a* und *f* verbundenes Voltmeter 100 — 5,5 = 94,5 Volt anzeigt. Durch die erste Lampe fliesst demnach ein Strom von 94,5 : 50 = 1,9 Amp. und durch die Leiterstücke *ab* und *ef* ein Strom von 3,6 Amp. Jetzt folgt, dass der Spannungsverlust in *ab* und *ef* zusammen 3,6 Volt und die Potentialdifferenz zwischen *e* und *b* 94,5 — 3,6 = 90,9 Volt beträgt. Der durch die zweite Lampe fliessende Strom hat eine Stärke von 90,9 : 50 = 1,82 Amp. Endlich ist die Intensität des dritten Teilstromes 1,78 Amp.

In manchen Fällen wendet man eine kombinierte Schaltung an (s. Bogenlampen). Diese erhält man aus Fig. 38, indem man in dem Stromwege *af* zwei oder mehrere Lampen hinter-

einander schaltet, ebenso in *b e* etc. Zu dieser Schaltung geht man notgedrungen über, wenn die vorhandene Netzspannung (Spannung zwischen *a* und *f* bezw. *b* und *e*) für die zur Verfügung stehenden Lampen o. dgl. eine zu grosse ist. Nehmen wir beispielsweise an, die zu installierenden Lampen hätten einen Widerstand von 110 Ohm (wenn sie brennen) und dürften höchstens mit 0,5 Amp. belastet werden. Würde man die Lampen einzeln an ein Netz von 110 Volt anschliessen, so würde durch jede ein zu starker Strom fliessen. Schaltet man aber je zwei Lampen hintereinander, so kommt ein Strom von der gewünschten Stärke zustande.

Sechstes Kapitel.

Stromarbeit, Watt, Stromwärme (Joulesche Wärme).

1. **Stromarbeit, Watt, Wattstunde.** Schon früher wurde der elektrische Strom mit einer Wasserkraft verglichen. Wollen wir die Arbeit messen, die fallendes Wasser in 1 Sekunde verrichten kann, so messen wir die Stromstärke in Litern und die Fallhöhe des Wassers oder das Gefälle in Metern; durch Multiplikation der erhaltenen Zahlen findet man den Effekt in Meterkilogrammen. Beträgt z. B. die Stromstärke 100 Liter und das Gefälle 8 m, so ist die theoretische Leistung der Wasserkraft gleich 100 kg $\times$ 8 m $=$ 800 Kilogrammeter oder $\frac{800}{75} = 10^2/_3$ PS.

Bei der Besprechung des Begriffes Potential ist schon nachgewiesen worden, dass die Elektrizität Arbeit leistet, wenn sie sich in Bewegung setzt, d. h. wenn sie von dem höheren Potential V_1 zum niedrigeren V_2 übergeht. Sind V_1 und V_2 konstant — eine Annahme, die man von den Polen einer Stromquelle machen darf —, so ist die Arbeit, die die Elektri-

zitätsmenge E leistet, wenn sie vom Potential V_1 auf das Potential V_2 fällt, proportional $(V_1 - V_2) . E$. Ist E = 1 Coulomb und $V_1 - V_2 = 1$ Volt, so nennt man die betreffende Arbeit 1 Volt-Coulomb oder 1 Joule[1] (= 10^7 Erg), gleichviel, in welcher Zeit die genannte Elektrizitätsmenge übergeht. Wird diese Arbeit in 1 Sekunde von der fliessenden Elektrizität geleistet, was der Fall ist, wenn ein Strom von 1 Amp. durch eine Leitung geht, an deren Enden eine Potentialdifferenz von 1 Volt herrscht, so beträgt der Effekt des betreffenden Stromes natürlich 1 Volt-Coulomb oder 1 Volt-Ampere. Diesen Effekt nennt man 1 Watt in ehrender Erinnerung an James Watt, den Erfinder der Dampfmaschine.

Beträgt die Potentialdifferenz an den Enden eines Leiters (an den Klemmen eines Apparates, einer Lampe etc.) e Volt und fliesst durch ihn ein Strom von J Amp., gehen also im Innern des Leiters in jeder Sekunde J Coulomb vom Potential $V + e$ zum Potential V oder vom Potential $+ \frac{e}{2}$ zum Potential $- \frac{e}{2}$ über, so ist der Effekt des Stromes $e . J$ Watt. Fliesst der Strom t Sekunden lang durch den Leiter, so ist die gesamte Stromarbeit gleich $e . J . t$ Volt-Coulomb (gewöhnlich sagt man, sie beträgt $e . J . t$ Watt). Diese Energie wird in dem Stromleiter — dem ganzen Stromkreise oder einem Teile desselben, ersteres wenn e die Klemmenspannung ist — in andere Energieformen umgesetzt.

Werden die beiden Pole einer Stromquelle, z. B. eines galvanischen Elementes, durch einen Draht miteinander verbunden, so wird die ganze im Elemente erzeugte elektrische Energie im Stromkreise, also im Innern des Elementes und in dem Drahte, in Wärme verwandelt. Ist E die elektromotorische Kraft, e die Klemmenspannung und J die Stromstärke, so werden in jeder Sekunde im Ganzen $E . J$ Watt ($E . J . 10^7$ Erg) in Wärme verwandelt, davon kommen $e . J$ Watt auf den äusseren Stromkreis.

---

1) Sprich D'jaul.

Bildet man einen Stromkreis aus Leitungsdrähten und einem Elektromotor, so wird die in der Stromquelle erzeugte elektrische Energie zum Teil in Wärme, zum Teil in mechanische Arbeit verwandelt; schalten wir noch einen Wasserzersetzungsapparat hinzu, so wird ausserdem ein Teil der Stromenergie für die Trennung der beiden Bestandteile des Wassers verbraucht, d. h. es wird elektrische Energie in chemische (Spannkraft) umgesetzt. Übrigens wird sowohl in dem Elektromotor als auch in dem Wasserzersetzungsapparate gleichzeitig Wärme erzeugt.

1 Watt ist, wie später gezeigt wird, äquivalent (gleichwertig) $\frac{1}{736}$ Pferdekraft (PS) oder

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt.}$$

Der Sinn dieser Gleichung ist folgender: Wenn eine Dynamomaschine bei 736 Volt elektromotorischer Kraft einen Strom von 1 Amp. oder bei 73,6 Volt einen Strom von 10 Amp. etc. abgeben soll, und man von Energieverlusten infolge der Reibung und des Luftwiderstandes, sowie von den Energieverlusten, die wir später kennen lernen, absieht, so genügt für den Antrieb der Dynamo eine einpferdige Kraftmaschine.

Würde unsere Dynamo bei konstanter elektromotorischer Kraft (etwa bei 736 Volt) eine Stunde lang einen Strom von 1 Amp. abgeben, so würde man in der technischen Sprache die gesamte von der Maschine abgegebene und im Stromkreise in andere Energieformen umgewandelte Stromarbeit 736 Wattstunden nennen. Die Beziehung zwischen Watt und Wattstunde ist also dieselbe wie zwischen Pferdekraft und Pferdekraftstunde.

Grosse Arbeitsleistungen eines elektrischen Stromes pflegt man in Kilowatt anzugeben:

$$1 \text{ Kilowatt} = 1000 \text{ Watt.}$$

Da der Begriff Watt von grosser Wichtigkeit ist, so soll er noch durch einige Beispiele erläutert werden.

1) Aus der Angabe, die Leistung einer elektrischen Maschine beträgt 10 Kilowatt (KW), kann nur der Schluss gezogen werden, dass zum Antriebe der Dynamo bei normaler Belastung min-

destens $\frac{10000}{736} = 13{,}6$ PS erforderlich sind; man weiss aber nicht, wieviel Volt die elektromotorische Kraft und wieviel Ampere die Stromstärke beträgt; denn 50 Volt $\times$ 200 Amp. = 10 Kilowatt, ebenso 100 Volt $\times$ 100 Amp. etc.

2) Wenn ein Elektromotor als 20pferdiger bezeichnet wird, so sind, abgesehen von der in seinen Drähten in Wärme umgesetzten elektrischen Energie, zu seinem Betriebe erforderlich

bei 100 Volt Klemmenspannung[1]) 2 . 73,6 Amp.,
" 200 " " 73,6 " etc.

3) Eine 16kerzige Glühlampe für 110 Volt verbrauche (bei 110 Volt Potentialdifferenz an den Enden ihres Fadens) 55 Watt. Wir schliessen, dass durch die Lampe ein Strom von $\frac{55}{110} = 0{,}5$ Amp. fliesst. — Brennt die Lampe 20 Stunden lang, so beträgt die ganze dem Netze entnommene Energie, die man gewöhnlich kurz als den Stromverbrauch bezeichnet, 20 . 55 Wattstunden = 1,1 Kilowattstunden.

2. **Joulesche Wärme.** Wir wollen uns jetzt mit der ausserordentlich wichtigen Frage beschäftigen, wie gross die durch das Fliessen der Elektrizität in einem Leiter erzeugte Wärme ist. Um Irrtümern vorzubeugen, ist es zweckmässig, bei den Betrachtungen von vornherein zwei Fälle voneinander zu unterscheiden und getrennt zu behandeln, nämlich

a) Der elektrische Strom leistet in dem betrachteten Teile des Stromkreises keine Arbeit, ausser dass er den Leitungswiderstand überwindet (es ist keine elektromotorische Gegenkraft vorhanden).

b) Der elektrische Strom leistet gleichzeitig eine andere Arbeit (Elektromotor, elektrolytischer Apparat).

a) Wenn der Spannungsverlust (das Potentialgefälle) in einem Drahte bei 1 Amp. Stromstärke 1 Volt beträgt, so leistet, wie wir gesehen haben, der elektrische Strom in dem Leiter eine sekundliche Arbeit von 1 Watt (es werden also in dem Leiter in jeder Sekunde 10 Millionen Erg oder $\frac{1}{9{,}81}$ Meterkilogramm Arbeit in Wärme umgesetzt). Die Strom-

1) Hier ist natürlich die an den Klemmen des Elektromotors gemessene Spannung gemeint.

wärme ist einer direkten Messung zugänglich — man taucht den Draht in Alkohol ein, misst die einer bestimmten Zeit entsprechende Temperaturerhöhung etc., Kalorimeter — und findet, dass einer elektrischen Energie von 1 Watt 0,24 kleine Wärmeeinheiten [1]) entsprechen

$$1 \text{ Watt} = 0{,}24 \text{ cal.} = 0{,}00024 \text{ Cal.}^{2)}.$$

Rechnen wir diese Wärmemenge durch Multiplikation mit 426 (s. S. 9) in Kilogrammeter um, so finden wir, dass

$$1 \text{ Watt} = 426 . 0{,}00024 \text{ mkg} = 0{,}10224 \text{ mkg oder}$$
$$1 \text{ mkg} = 9{,}81 \text{ Watt}.$$

Im Vorstehenden ist von der Beziehung zwischen 1 Watt und 1 Meterkilogramm (bezw. 1 Erg) kein Gebrauch gemacht worden. Geht man von dieser Beziehung aus, so ist folgendermaßen zu schliessen: 1 Watt $= \frac{1}{9{,}81}$ Meterkilogramm, da nun 426 mkg = 1 Cal., so folgt, dass 1 Watt $= \frac{1}{9{,}81} . \frac{1}{426} = 0{,}00024$ Cal. = 0,24 cal.

Die Zahl 0,24 (genauer 0,2394) nennt man das elektrische Wärmeäquivalent.

Besteht zwischen den Endpunkten eines Leiters die Spannung e Volt, und fliesst durch ihn ein Strom von J Amp., so beträgt die Stromarbeit in dem Leiter pro Sekunde (der Energieverlust) e.J Watt; mithin entsteht die Wärmemenge

$$q = 0{,}24 . e . J \text{ cal.},$$

und in t Sekunden wird die Wärmemenge

$$Q = 0{,}24 . e . J . t \text{ cal.}$$

erzeugt.

Wie wir früher gesehen haben, ist e = w.J, mithin

$$Q = 0{,}24 . w . J^2 . t \text{ cal.}$$

Aus dieser Gleichung kann man folgende zwei Sätze ablesen.

1) Bei gleicher Stromstärke ist die in einer bestimmten Zeit aus elektrischer Energie entstandene Wärme-

---

1) Eine kleine Wärmeeinheit oder 1 Grammkalorie (cal.) ist diejenige Wärmemenge, die man 1 g Wasser zuführen muss, wenn man seine Temperatur um 1° Cels. erhöhen will.

2) Statt „gleich“ müssten wir streng genommen „äquivalent“ sagen.

menge proportional dem Leitungswiderstande. Lässt man beispielsweise durch einen Kupfer- und einen Eisendraht von gleicher Länge und gleichem Querschnitte denselben Strom fliessen, sind die beiden Drähte also hintereinander geschaltet, so wird in dem Eisendrahte mehr Wärme erzeugt als in dem Kupferdrahte (auf den Eisendraht kommt ein grösseres Potentialgefälle als auf den Kupferdraht). Durchfliesst ferner derselbe Strom verschiedene Kupferdrähte, deren Querschnitte ungleich sind, so werden in derselben Zeit in gleichen Stücken der verschiedenen Drähte ungleiche Wärmemengen erzeugt. Der dünnste Draht fängt, wenn man den Strom allmählich verstärkt, zuerst an zu glühen und schmilzt zuerst durch. (Es kommt noch hinzu, dass der dünnere Draht eine geringere Wärmekapazität hat, d. h. durch ein kleineres Wärmequantum bis zum Schmelzpunkte erhitzt wird.)

Für einen Versuch kann man den auf Seite 48 abgebildeten Apparat benutzen, wenn man mit geringer Stromstärke arbeiten will. Man lässt den Strom durch die beiden hintereinander geschalteten Spiralen, die verschiedene Querschnitte haben, fliessen; stand die Flüssigkeit in den beiden U-förmigen Röhren anfänglich gleich hoch, so bilden sich ungleiche Niveaudifferenzen aus.

Ein anderer einfacher Versuch besteht darin, dass man in einen aus dickeren Kupferdrähten bestehenden Stromkreis einen dünnen Eisendraht einschaltet. Bei genügend starkem Strome wird der Eisendraht glühend, während die Kupferdrähte nur schwach erwärmt werden.

2) Die in demselben Leiter erzeugte Wärmemenge (in 1 Sekunde) wächst mit dem Quadrate der Stromstärke. Bei der Stromstärke 2 Amp. ist die Stromwärme viermal so gross wie bei der Intensität 1 Amp.

Diese Gesetze werden nach ihrem Entdecker die Jouleschen Gesetze genannt.

b) In dem zweiten Falle kann man aus der Spannung und der Stromstärke nicht — wie eben — die Stromwärme berechnen. Denn das Produkt e.J gibt uns die ganze in andere Energieformen umgewandelte elektrische Arbeit an, und von dieser letzteren wird nur ein Teil in Joulesche Wärme umgesetzt. Will man die beiden Summanden einzeln ermitteln, so muss

man den Widerstand in dem betreffenden Teile des Stromkreises kennen oder bestimmen. Wird dieser mit w bezeichnet, so ist wie früher

$$Q = 0{,}24 \cdot w \cdot J^2 \text{ cal. (pro Sekunde).}$$

Es ist zu beachten, dass jetzt nicht $w \cdot J$ gleich e ist; e, die Klemmenspannung des Elektromotors oder des elektrolytischen Apparates muss grösser als $w \cdot J$ sein. Ein Elektromotor, allgemeiner ein Apparat, in dem der elektrische Strom eine Arbeit verrichtet, verhält sich also so, als ob sein Widerstand grösser als der Ohmsche wäre. (Näheres siehe „Elektromotoren“.)

Der stationäre Zustand. Wenn durch einen Leiter ein Strom geschickt wird, so steigt seine Temperatur. Der Wärmeerzeugung steht Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung gegenüber. Bei grösserer Länge des Leiters kann man die Wärmeabgabe durch Leitung vernachlässigen; die Strahlung wird um so stärker, je mehr die Temperatur des Leiters steigt, und es tritt bei jeder Stromstärke ein Zeitpunkt ein, in dem Wärmezufuhr und Wärmeverlust einander gleich sind. Der dann herrschende Zustand wird der stationäre genannt.

Die Temperatur, bis zu der sich ein gegebener Leiter, z. B. ein Kupferdraht, erwärmt, hängt von verschiedenen Umständen ab, von denen die Stromdichte erwähnt sei. Man versteht darunter den Quotienten $\frac{\text{Amperezahl}}{\text{Querschnitt}}$. Fliesst z. B. durch einen Draht von 10 mm^2 ein Strom von 20 Amp., so beträgt die Stromdichte 2 Amp.

Das Peltier-Phänomen (der sogen. Peltier-Effekt) wird in dem Kapitel Thermoelektrizität behandelt.

Siebentes Kapitel.

Wechselwirkungen zwischen Strömen und Magneten, Elektromagnetismus.

1. Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom. Wenn man über einer Magnetnadel, die mittels eines Achathütchens auf einer Stahlspitze ruht, sich also in einer horizontalen Ebene frei drehen kann, einen der Nadel parallel laufenden Draht spannt und durch diesen einen elektrischen Strom schickt, so beobachtet man, dass die Nadel abgelenkt wird, und zwar sucht sie sich senkrecht zum Drahte bezw. zur Stromrichtung zu stellen. Der Strom wirkt also der erdmagnetischen Kraft, welche die Nadel in der Nord-Südrichtung festzuhalten sucht, entgegen.

Um genauere Versuche über die Ablenkung der Magnetnadel auszuführen, bedient man sich des Oerstedtschen Apparates (s. Fig. 39). Diesen stellt man vor Beginn des Versuches so auf, dass sich die (ruhende) Magnetnadel *ns* im Innern des Rahmens befindet, also parallel der oberen Seite des rechteckig gebogenen Messingstreifens läuft. Man findet, dass die Grösse der Ablenkung, d. h. des Winkels, den die abgelenkte Nadel mit ihrer ursprünglichen Richtung bildet, mit der Stromstärke wächst und dass der Drehungssinn der Nadel von der Stromrichtung abhängt. Die Richtung der Ablenkung kann man mit Hülfe der Ampèreschen Schwimmregel oder mit Hülfe der sogen. Handregel ermitteln. Die letztere lautet: „Man halte die rechte Hand ausgestreckt parallel dem Stromleiter in solcher Lage,

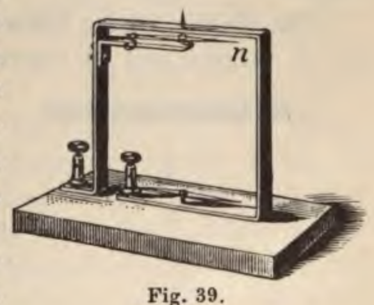


Fig. 39.

dass der Strom an der Handwurzel ein- und an den Fingerspitzen austritt, die innere Handfläche gegen den Magnet gerichtet, dann zeigt der abgestreckte Daumen die Richtung an, nach welcher der Nordpol abgelenkt wird". Tritt also der Strom bei der Klemme links in den Apparat, so tritt *n* hinter und *s* vor die Papierebene.

Mit Hülfe der Handregel kann man sich leicht davon überzeugen, dass der Strom in den verschiedenen Teilen des Rechtecks (Fig. 39) in demselben Sinne auf die Nadel einwirkt. Dasselbe gilt, wenn man um die Nadel eine Drahtschleife legt. (Man denke sich die Schleife in kleine Stücke zerlegt und bestimme für jedes derselben die Ablenkung des Nordpols.)

Die Ablenkung eines Magnets durch den elektrischen Strom kann man benutzen, 1) um das Vorhandensein eines Stromes nachzuweisen, 2) um elektrische Ströme bezüglich ihrer Stärke miteinander zu vergleichen (Messung). Apparate, die dem ersteren Zwecke dienen, nennt man Galvanoskope und solche, die eine Messung der Stromstärke gestatten, Galvanometer. Selbstverständlich ist ein Galvanometer zugleich ein Galvanoskop.

Um die Einwirkung eines schwachen elektrischen Stromes auf die Magnetnadel zu verstärken, führt man einen dünnen, isolierten (z. B. mit Seide besponnenen) Draht in vielen Windungen um eine leicht bewegliche, an einem Faden (Cocon) aufgehängte Magnetnadel herum, die sich zwischen den Windungen befindet (Multiplikator, s. Fig. 40). Jede einzelne Windung wirkt auf die Nadel ablenkend, und die einzelnen Kräfte addieren sich in ihren Wirkungen.

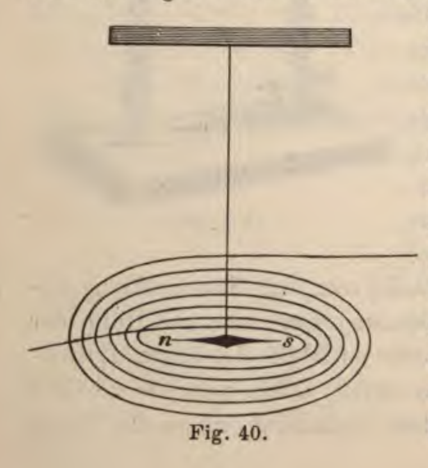


Fig. 40.

Eine Abbildung eines empfindlichen Galvanoskops (Multiplikators) zeigt die Fig. 41. Der isolierte Draht ist auf den rechteckigen Rahmen [1]) gewickelt, der unter der in 360 Grad eingeteilten horizontalen, kreisförmigen Scheibe liegt. Die Drahtenden sind an zwei Klemmschrauben befestigt (von diesen ist in der Figur nur eine sichtbar). Der Strom wirkt ablenkend auf ein **astatisches Nadelpaar**. Ein solches besteht aus zwei fest miteinander verbundenen Magneten, die so gerichtet sind, dass der Norpol *n* des oberen Stäbchens senkrecht unter dem Südpole *s* des unteren liegt. Das astatische Nadelpaar ist an einem Coconfaden aufgehängt, der oben an der Achse einer Schraube befestigt ist, damit man

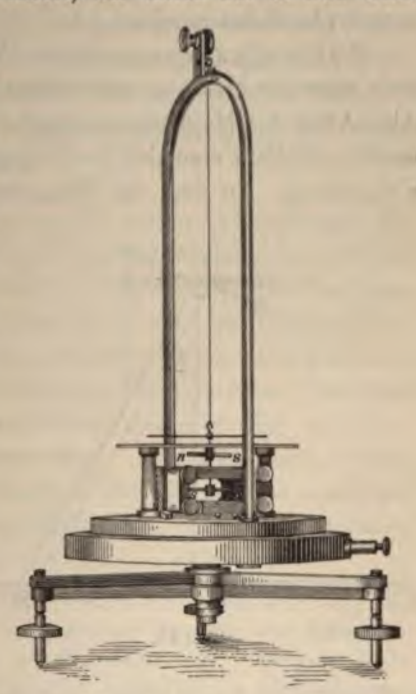


Fig. 41.

die Magnete heben und senken kann (Transport). Ein leichter über der Skala schwebender Zeiger ist mit der Achse des Nadelpaares fest verbunden und macht die Ablenkung sichtbar.

Durch die Verwendung des astatischen Nadelpaares wird nicht nur der Einfluss des Erdmagnetismus eliminiert (bezw. auf einen sehr kleinen Betrag reduziert), sondern man erzielt auch eine Verstärkung des Antriebes. Denn das obere Magnet-

---

1) Ist der Rahmen aus Kupferblech angefertigt, so werden in ihm, wenn die Nadel schwingt, Ströme induziert (s. Foucaultsche Ströme). Diese haben eine solche Richtung, dass sie die Bewegung der Nadel zu hemmen suchen. Die Nadel kommt also schneller zur Ruhe, wie wenn der Rahmen aus einem Nichtleiter besteht (**Dämpfung**).

stäbchen wird durch die in seiner Nähe liegenden Windungsteile (die anderen kommen wegen der grossen Enfernung kaum in Betracht) in demselben Sinne angetrieben wie das untere (Antriebssummierung.)

Spiegelgalvanometer. Wenn es sich um den Nachweis oder die Messung sehr schwacher Ströme handelt, ist die Ablenkung des Magnetsystems sehr klein; um diese sichtbar zu machen, bedient man sich der Poggendorfschen Spiegelablesung. An dem das Magnetsystem tragenden Faden ist ein kleiner Spiegel befestigt, auf den ein Fernrohr gerichtet wird. Es sei in Fig. 42 *ab* ein horizontaler Schnitt durch den Spiegel, *CD* ein Schnitt durch eine in etwa 1 m Entfernung dem Spiegel gegenüber stehende vertikale, in Millimeter eingeteilte Skala (man vgl. auch die Figuren 44 und 45). Das in der Mitte von *CD* errichtete Lot *no* möge auf dem Spiegel senkrecht stehen.

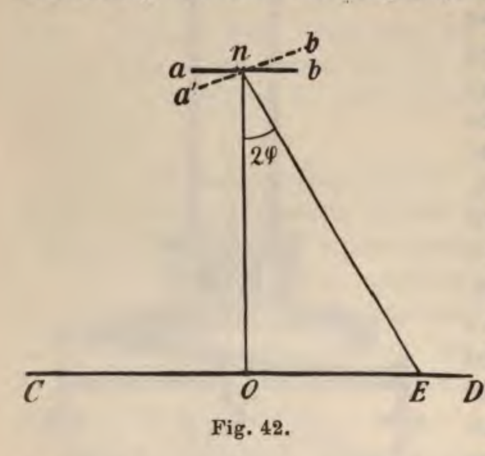


Fig. 42.

Wird die Skala beleuchtet, so sendet jeder ihrer Punkte nach den verschiedenen Richtungen des Raumes hin Lichtstrahlen aus; einer der von *o* ausgehenden Strahlen fällt also in die Linie *no*. Dieser wird an dem Spiegel so reflektiert, dass der zurückgeworfene Strahl mit *no* zusammenfällt. Ist das Fernrohr so aufgestellt, dass der reflektierte Strahl *no* in seine Achse fällt, so erblickt man in ihm das Bild des Skalenpunktes *o*. Der Spiegel *ab* drehe sich infolge einer kleinen Ablenkung des Magnetsystems um den Winkel $a n a' = \varphi$. Man sieht jetzt in dem Fernrohr nicht mehr das Bild von *o*, sondern das Bild eines Punkt *E* bezw. der bei *E* auf der Skala stehenden Zahl. Ist *d* die Anzahl der Skalenteile (Millimeter) zwischen *o* und *E*, so ist

$$\text{tang } 2\varphi = \frac{d}{no}.$$

Da auch *no*, d. h. die Entfernung zwischen dem Spiegel und der Skala bekannt ist, so kann man φ berechnen.

Dass man sehr kleine Winkel (Ablenkungen) auf diese Weise messen kann, ergibt sich aus folgendem Beispiele: Es sei $EO = 1$ cm, $no = 100$ cm. Dann ist $\text{tang } 2\varphi = \frac{1}{100}$. Man findet, dass $\varphi = 17'$.

Man kann nachweisen, dass für kleine Ablenkungen die Stromstärke der Tangente des Ablenkungswinkels proportional ist. Für kleine Winkel ist aber die trigonometrische Tangente dem Winkel proportional. Man kann also die Stromstärken (bei kleinen Ablenkungen) proportional den in dem Fernrohr abgelesenen Ausschlägen (Zahlen der Skala) setzen. Zunächst ist daher das Spiegelgalvanometer geeignet für die Vergleichung verschiedener Stromstärken. Weiss man nun, welche Stromstärke bei einer bestimmten Entfernung *no* zwischen Spiegel und Fernrohr einem Skalenteile entspricht, so kann man Stromstärken direkt messen (Galvanometer).

Bei den Spiegelgalvanometern benutzt man vielfach Glockenmagnete (W. Siemens). Ein solcher besteht aus einem an einem Ende halbkugelförmig geschlossenen, am anderen Ende offenen kleinen Stahlrohr (wie ein Fingerhut). Der glockenförmige Eisenkörper enthält an zwei sich gegenüberliegenden Stellen einen von oben nach unten laufenden Schlitz (s. Fig. 43, die einen Querschnitt darstellt) und wird wie ein Hufeisenmagnet magnetisiert. Er hängt vertikal mit dem offenen Ende nach unten.

Fig. 43.

Der Magnet befindet sich mit engem Spielraum in einem in einer Kupferkugel angebrachten Ausschnitte. Auf diese Weise wird eine vorzügliche Dämpfung erzielt (man vergl. die Fussnote auf Seite 87).

Ein Ablesefernrohr mit Skala, die durch Glühlampen beleuchtet wird, ist in Fig. 44 (S. 90) abgebildet. Die Zahlen sind auf der Skala so angeschrieben, dass ihr umgekehrtes Bild — ein solches sieht man im Fernrohr — lesbar ist. Das Fernrohr ist mit Triebeinstellung versehen und die Skala verschiebbar.

Für objektive Ablesungen und für Demonstrationszwecke benutzt man folgende Anordnung: dem feststehenden (z. B. auf einer Wandkonsole, am besten aus Marmor) Spiegelgalvanometer gegenüber ist die Ablesevorrichtung (ebenfalls auf einer Wandkonsole) aufgestellt, deren wesentliche Teile eine Lichtquelle und eine Skala sind. Die Lichtquelle (z. B. eine Glühlampe) wird von einem undurchsichtigen Gehäuse umgeben, in dem sich ein enger Spalt befindet (s. Fig. 45).

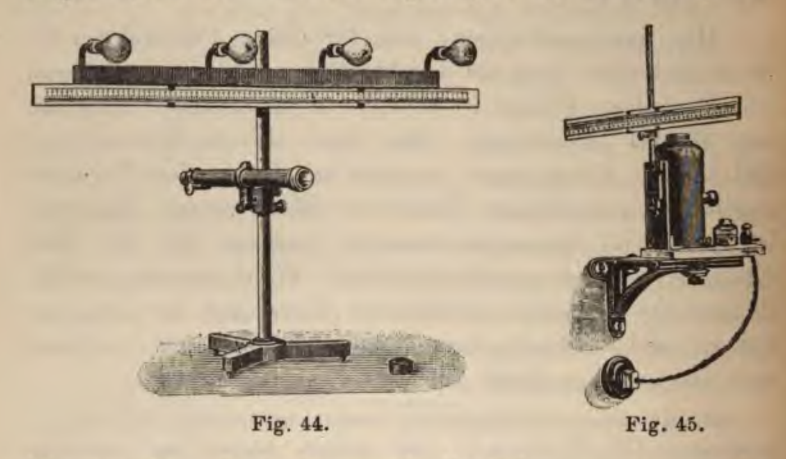


Fig. 44. Fig. 45.

Die aus dem Spalt kommende Lichtebene muss auf den Spiegel des Galvanoskops fallen und an dessen Oberfläche so reflektiert werden, dass sie nach der Reflexion den Nullpunkt der Skala trifft (wenn kein Strom durch den Apparat fliesst).

Die Empfindlichkeit der Spiegelgalvanometer ist im Laufe der Jahre so sehr gesteigert worden, dass bei Widerständen von 1000 bis 2000 Ohm des Instrumentes Ströme von 2 bis 1 Hunderttausendmillionstel Ampere nachgewiesen bezw. gemessen werden können[1]).

2. **Das magnetische Feld eines Stromes.** Wir betrachten zunächst einen geradlinigen Stromleiter. Ein solcher wird überall von kreisförmigen, in konzentrischen Kreisen verlaufenden Kraftlinien umgeben, deren Ebenen senkrecht zu

1) Näheres über die Einrichtung und den Gebrauch der Spiegelgalvanometer siehe Kittler, Lehrbuch der Elektrotechnik.

dem Leiter (dem Strome) stehen; diese Kraftlinien kann man durch einen einfachen Versuch sichtbar machen. Ein vertikal gespannter dicker Draht gehe durch ein Loch in einem Kartonblatt oder in einer Glasplatte o. dgl. hindurch; das Blatt liege horizontal und werde mit Eisenfeilspänen bestreut. Schickt man einen starken Strom (15—20 Amp.) durch den Draht und erschüttert das Blatt durch leises Klopfen etwas, so ordnen sich die Eisenteilchen zu konzentrischen Kreisen.

Jedes einzelne Eisenteilchen wird magnetisch und sucht sich senkrecht zum Leiter, d. h. in die Richtung der Kreistangente zu stellen. (Man vergleiche das Biot-Savartsche Gesetz.)

Die Richtung der Kraftlinien, der Sinn in dem sie um den Leiter herumlaufen, ergibt sich mit Hülfe der Ampèreschen Regel. Die Eisenteilchen werden ja in kleine Magnete verwandelt, und die Richtung der Kraftlinien ist durch die Richtung gegeben, nach der die kleinen Nordpole hinsehen (s. Fig. 46). Man findet folgende Gedächtnisregel: „Umfasst man den stromdurchflossenen Leiter mit der rechten Hand in der Weise, dass der Strom bei dem ausgestreckten (an den Leiter gelegten) Daumen an der Wurzel eintritt, so umfliessen die Kraftlinien den Leiter so, dass sie an den Spitzen der übrigen Finger austreten".



Fig. 46.

In Fig. 46, in der L den Schnitt durch den senkrecht auf der Papierebene stehenden Leiter darstellt, ist also angenommen, dass der Strom von unten nach oben fliesst.

Da die Kraftlinien eines geraden Leiters Kreise sind, und ein freier Nordpol sich in der Richtung der Kraftlinien vorwärts bewegt, so folgt, dass ein isolierter, in der Luft schwebender Nordpol, der sich in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters befindet, um diesen rotieren würde. Über die Kraft, mit der der Pol vorwärts getrieben wird, die man also aufwenden muss, wenn man seine Bewegung verhindern will, gibt das

Biot-Savartsche Gesetz Auskunft. Es handle sich um einen festen, geradlinigen, sehr (unendlich) langen Leiter. Da

die Kraft, mit der die verschiedenen Stücke des stromdurchflossenen Leiters (Stromelemente) auf den Pol *m* (s. Fig. 47) einwirken, offenbar von der Entfernung abhängig ist, so bildet man für jedes Element den Ausdruck für die Kraft und addiert die einzelnen Brüche. Ist λ in Fig. 47 ein Stromelement, befindet sich in *m* die magnetische Masse *m* [1]) und ist *i* die Stärke des Stromes, der durch den in der Papierebene liegenden Leiter fliesst, dann ist die Kraft, mit welcher der durch λ fliessende Strom den Pol *m* aus der Papierebene herauszutreiben sucht, gleich

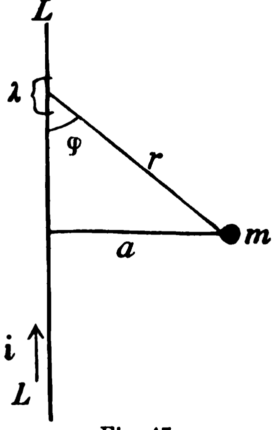


Fig. 47.

$$\frac{m \,.\, i \,.\, \lambda \,.\, \sin \varphi}{r^2}.$$

Durch mathematische Berechnungen findet man, dass die von dem ganzen Strome auf *m* ausgeübte Kraft *K*

$$K = 2 \frac{m\,i}{a},$$

wo *a* der senkrechte Abstand des Poles von dem Stromleiter *L* (die Distanz) ist. Ist $m = +1$, *m* also ein Einheitspol, so ist *K* die Stärke des durch den Strom *i* im Punkte *m* erzeugten Feldes. Bezeichnet man diese wie früher mit $\mathfrak{H}$, so ist also

$$\mathfrak{H} = 2 \frac{i}{a}.$$

Die Kraft K bezw. die Feldstärke $\mathfrak{H}$ hängt von der Natur des den Stromleiter umgebenden Mediums ab. Hat dieses nicht die Permeabilität 1, wie eben stillschweigend angenommen wurde, sondern die Permeabilität μ, so ist

$$\mathfrak{H} = 2\, \mu \,.\, \frac{i}{a}.$$

1) Man kann sich vorstellen, dass *m* der Nordpol eines Magnets sei, dessen Südpol sehr weit entfernt ist. Macht man diese Annahme nicht, so muss man auch die Kraft berücksichtigen, die der Strom auf den Südpol ausübt.

Wenn es sich um eine einfache (unvermittelte) Fernwirkung handelte, wie bei der Schwerkraft, wenn also das zwischen dem Leiter und dem Pole liegende Medium sich ganz passiv verhielte, so müsste $\mathfrak{H}$ von der Natur des Mediums unabhängig sein.

Aus der Gleichung

$$\mathfrak{H} = 2\,\frac{i}{a} \text{ oder } i = \frac{\mathfrak{H}\cdot a}{2}$$

können wir eine Definition für die Einheit der Stromstärke im C.G.S.-System ableiten. Ist nämlich $a = 1$ cm, und denken wir uns den Strom so reguliert, dass $\mathfrak{H} = 2$ wird, dass also im Punkte *m* die Feldstärke 2 C.G.S.-Einheiten beträgt (der Pol $+1$ mit der Kraft 2 Dynen vorwärts getrieben wird), so wird $i = 1$. Ein Strom hat also die Stärke Eins (einer C.G.S.-Einheit), wenn er beim Durchfliessen eines geraden, unendlich langen Leiters im Abstande 1 cm von dem Leiter eine Feldstärke von 2 C.G.S.-Einheiten erzeugt (wenn also ein im Abstande 1 cm von dem Leiter befindlicher Einheitspol mit der Kraft 2 Dynen senkrecht zur Papierebene vorwärts getrieben wird). Diese Einheit nennt man, da sie aus dem Grundgesetz des Elektromagnetismus, d. h. der Lehre von der Einwirkung eines elektrischen Stromes auf einen Magneten, abgeleitet ist, die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Diese ist von der Technik nicht angenommen. 1 Ampere ist der zehnte Teil der eben definierten C.G.S.-Einheit.

1 elektromagnetische Einheit = 10 praktischen Einheiten = 10 Ampere.

Wir wollen jetzt das Biot-Savartsche Gesetz anwenden auf einen kreisförmigen Leiter. Einen solchen kann man sich in viele kleine Stücke zerlegt denken, die man als geradlinige Leiter ansehen darf [s. Fig. 48 [1]) S. 94]. Für jedes Element ist jetzt die Strecke *r* der Fig. 47 gleich dem Radius

1) Um durch den Leiter einen Strom schicken zu können, muss man ihn an einer Stelle aufschneiden, in die Schnittfläche ein dünnes isolierendes Blättchen (Papier) schieben und die Enden mit einer Stromquelle verbinden.

des Kreises, $\varphi = 90^0$ und $\sin \varphi = 1$. Man findet leicht, dass die Gesamtwirkung aller Elemente, d. h. die Einwirkung des ganzen Stromkreises auf einen im Mittelpunkte befindlichen Einheitspol oder die Feldstärke im Mittelpunkte gleich $\frac{2 \pi i}{r}$ ist.

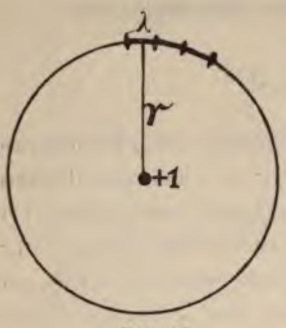


Fig. 48.

Wählt man r = 1 cm, so ist

$$\mathfrak{H} = 2 \pi i \text{ oder } i = \frac{\mathfrak{H}}{2 \pi}.$$

Denkt man sich den Strom so stark gewählt, dass $\mathfrak{H} = 2 \pi$ Dynen, so wird i = 1. Man erhält daher für die elektromagnetische Einheit der Stromstärke auch folgende Definition: Durch einen kreisförmigen, dünnen Draht von 1 cm Radius fliesst ein Strom von der Stärke Eins (im C.G.S.-System), wenn die Gesamtwirkung auf einen sich im Mittelpunkte befindlichen Einheitspol gleich 2π Dynen ist.

Wenn durch einen Leiter ein Strom fliesst, dessen Stärke gleich der elektromagnetischen Einheit ist, so gehen in 1 Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt 10 Coulomb hindurch. Nun ist 1 Coulomb gleich $3 . 10^9$ elektrostatischen Einheiten (siehe S. 33). Mithin fliessen bei der angenommenen Stromstärke per Sekunde $3 . 10^{10}$ elektrostatische Einheiten der Elektrizitätsmenge durch den Querschnitt. $3 . 10^{10}$ ist die Lichtgeschwindigkeit im C.G.S.-System. Diese merkwürdige Beziehung zwischen der elektromagnetischen und der elektrostatischen Einheit wurde zuerst von W. Weber aufgedeckt.

Bei einem kreisförmigen Leiter wird wie bei einem geradlinigen Drahte jeder Querschnitt von Kraftlinien eingehüllt. Die Verhältnisse sind aber jetzt komplizierter, weil die Kraftlinien aufeinander einwirken; sie setzen sich zu resultierenden Kraftlinien zusammen. Man kann nachweisen, dass die Kraftlinien eines Kreisstromes zum Teil senkrecht (in der Mitte), zum Teil schief die Ebene des Kreises durchsetzen, also einen ähnlichen Verlauf haben wie eine den Kreis aus-

füllende Eisenscheibe, die auf der einen Seite nord- auf der anderen südmagnetisch ist. Man sagt daher, dass sich ein geschlossener Kreisstrom in bezug auf seine Einwirkung auf Magnetpole gerade so verhält wie ein kleiner durch die Kreisebene hindurchgesteckter Magnet.

Solenoid (σωλήν = Röhre). Ein solches erhält man, wenn man einen Draht auf einen Holzcylinder, eine Glasröhre o. dergl. wickelt; es ist also nichts anderes als eine Drahtspirale oder eine Drahtspule. Offenbar kann man sich ein Solenoid aus einzelnen hintereinander geschalteten kreisförmigen (oder nahezu kreisförmigen) Leitern zusammengesetzt denken. Die Kraftlinien der einzelnen Windungen setzen sich zu resultierenden Kraftlinien zusammen, die mit denjenigen eines in das Solenoid geschobenen und sein Inneres ausfüllenden Magnetstabes ungefähr zusammenfallen. Um den Verlauf der Kraftlinien im Innern einer Spirale sichtbar zu machen, schiebt man in dieselbe eine mit Eisenpulver bestreute Scheibe aus Kartonpapier und lässt durch das Solenoid einen kräftigen Strom fliessen. Man findet, dass die Kraftlinien in der Mitte der Spule gerade Linien sind. Die elektromagnetischen Fernwirkungen einer stromdurchflossenen Spirale sind also identisch mit den Wirkungen eines Magnets.

Dies kann man durch folgenden Versuch nachweisen. Man befestige eine leichte Magnetnadel mit Wachs auf einer ca. 1 cm dicken Korkscheibe und lasse den Kork auf Wasser schwimmen. Auf einen Holzstab wird ein längerer isolierter Draht gewickelt; die Enden des Drahtes sind mit einer kräftigen Stromquelle (z. B. einem Bunsen-Elemente) zu verbinden. Wird nun das eine Ende des Stabes der schwimmenden Nadel genähert, so findet man, dass der eine Magnetpol angezogen, der andere aber abgestossen wird, und dass die Nadel dem langsam bewegten Stabe folgt oder sich von ihm entfernt. Dreht man den Stab um 180°, so wird derjenige Pol angezogen, der eben abgestossen wurde.

Da sich ein Solenoid wie ein Magnet verhält, so wird weiches Eisen, dass sich in seiner Nähe befindet (am besten in der Verlängerung der Solenoidachse) durch Induktion magnetisch. Tritt bei dem rechtsgewundenen Solenoid *a b* in

Fig. 49 der Strom bei *a* ein und bei *b* aus, so verhält sich das Ende rechter Hand wie ein Südpol. Folglich wird bei dem der Spule genäherten Eisenstabe *cd* links ein Nordpol induziert und der Stab in das Innere des Solenoids hineingezogen. Fällt die Mittelebene von *cd* (senkrecht zur Achse des Stabes) mit derjenigen des Solenoids zusammen, so heben sich die auf die beiden Pole ausgeübten Kräfte auf.

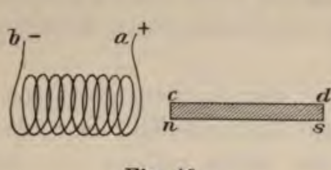


Fig. 49.

Die anziehende Kraft, die eine stromdurchflossene Spule auf einen Eisenkern ausübt, findet in der Elektrotechnik vielfach Verwendung, z. B. bei Messinstrumenten, für die Regulierung von Bogenlampen.

3. **Ablenkung eines Stromleiters durch einen Magnet.** Eine Umkehrung des im Anfange dieses Kapitels beschriebenen Versuches, nämlich der Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom, ist die Ablenkung eines beweglich angeordneten Stromleiters durch einen ihm genäherten Magnetpol[1]). Mit einfachen Hülfsmitteln kann man dies folgendermaßen nachweisen. Man stellt sich aus Staniol ein 1—2 m langes und 1—2 cm breites Band her, hängt dieses an zwei Stativen so auf, dass es einen stark gewölbten Bogen bildet und schickt durch den Streifen einen elektrischen Strom. Nähert man dem Stromleiter den Nordpol eines längeren Magnetstabes, so sieht man, dass sich das Band bewegt[2]).

---

1) Dass das der Fall sein muss, folgt aus dem Prinzip von Aktion und Reaktion. Nach diesem kann keine Wirkung (seitens des Stromleiters) auf einen Magnetpol ausgeübt werden, ohne dass eine gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft (seitens des Magnetpols) auf den Stromkreis ausgeübt wird.

2) Hierhin gehört auch die Ablenkung, die ein Lichtbogen erfährt, wenn man ihm einen Magnetpol nähert; einen Lichtbogen kann man sich nämlich aus sehr feinen (und sehr leicht beweglichen) Stromfäden zusammengesetzt denken. Auch die Ablenkung der Kathodenstrahlen durch einen Magnet ist hier zu erwähnen.

Die Richtung, in der sich ein beweglich angeordneter geradliniger Leiter unter dem Einflusse eines (feststehenden) Magnetpols bewegt, bezw. die Richtung der auf ihn wirkenden Kraft steht senkrecht auf den Kraftlinien und senkrecht auf der Richtung des Stromes; der Leiter wird parallel zu sich selbst verschoben.

Denkt man sich eine menschliche Figur mit dem Strome schwimmend und in die Richtung der Kraftlinien sehend, so zeigt ihre ausgestreckte Linke in die Richtung der Bewegung.

Es sei N (Fig. 50) die obere Fläche eines senkrecht zur Papierebene (unterhalb derselben) stehenden Magnetstabes, S_1 und S_2 seien zwei feste Gleitschienen, AB sei der bewegliche Leiter. Die Kraftlinien laufen senkrecht zur Papierebene nach oben. Die Bewegungsrichtung wird durch den grossen Pfeil v angegeben. — Kraftlinienrichtung, Stromrichtung und Bewegungsrichtung bilden die Achsen eines (räumlichen) rechtwinkligen Koordinatensystems (wie die drei in einer Ecke eines Zimmers zusammenstossenden Kanten).

Fig. 50.

Die Kraft in Dynen, die auf den Stromleiter wirkt, ist gleich dem Produkte aus der Stromstärke (in elektromagnetischen Einheiten), der Länge $AB = 1$ des Leiters (in cm) und der Feldstärke $\mathfrak{H}$, die überall, wo sich der Leiter befindet, dieselbe sei:

$$P = i.l.\mathfrak{H}.$$

Drückt man i in Ampere aus, so ist

$$P = \frac{1}{10} i.l.\mathfrak{H}.$$

Will man die Kraft in Kilogramm erhalten, so muss man durch 981 000 dividieren, also

$$P = \frac{1}{9810000} i.l.\mathfrak{H} \text{ kg}.$$

Auf einen Leiter also, durch den ein Strom von 20 Amp. fliesst und der sich auf einer Länge von 1 m in einem konstanten Felde

von 5000 C.G.S.-Einheiten befindet, wirkt eine Kraft von 1,019 kg.

Die Wechselwirkung zwischen magnetischen Feldern und elektrischen Strömen bildet das Prinzip der Elektromotoren.

Um nachzuweisen, dass ein Stromkreis von einem Magnet abgelenkt wird, bedient man sich des Ampèreschen Gestelles. Ein solches ist in Fig. 51 abgebildet. In die Näpfchen *n* und *n'* giesst man einen Tropfen Quecksilber. Wenn der Stromkreis *abcd* sehr leicht beweglich ist, dreht er sich so lange, bis seine Achse, d. h. ein auf seiner Ebene errichtetes Lot, parallel einer Kompassnadel läuft (unter dem Einflusse des Erdmagnetismus). Nähert man einen Magnetpol, so erfolgt eine Drehung des Stromkreises.

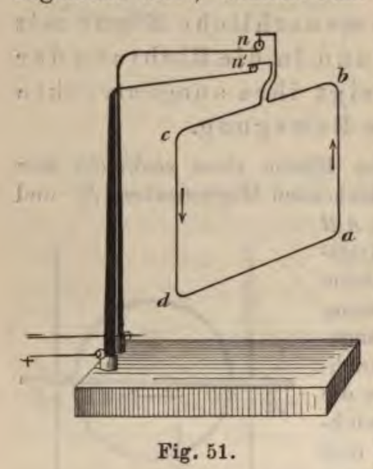


Fig. 51.

Geschichtliches. Die Einwirkung des elektrischen Stromes auf Magnete wurde von Oerstedt im Jahre 1820 entdeckt. Nach dieser Entdeckung wurde besonders die galvanische Messtechnik gefördert. Die Ausbildung des Galvanometers in den Jahren 1820—1825 knüpft sich namentlich an die Namen Schweigger, Poggendorf, Nobili. Ebenfalls im Jahre 1820 legte Biot der Pariser Akademie eine höchst wichtige Arbeit vor, worin auf Grund der in Gemeinschaft mit Savart durchgeführten Untersuchungen das fundamentale Gesetz über Leiterstrom und Magnet ausgesprochen wird. — Die Kombination zweier Magnete zu einem astatischen System ist eine Erfindung Ampères (1821), Verwendung fand diese Idee bei den Galvanoskopen durch Nobili (1827). — Die Ablenkung eines beweglichen Stromleiters durch einen genäherten Magnet wurde auch von Oerstedt beobachtet. — Arago zeigte, dass jeder stromdurchflossene Leiter in Solenoidform die Eigenschaften eines Magnets habe. Dieselbe Entdeckung scheint unabhängig davon Seebeck im Jahre 1820 gemacht zu haben.

4. Magnetisierung durch den Strom (Elektromagnete). Die bis jetzt besprochenen Wirkungen zwischen Strömen und

Magneten können wir als ponderomotorische Wirkungen bezeichnen, indem es sich um die Bewegung von Massen (Magneten, Stromleitern) handelte. In diesem Abschnitte werden wir sehen, dass ein elektrischer Strom im Innern des Eisens Verschiebungen (des magnetischen Fluidums, bezw. Drehungen der Molekularmagnete) hervorruft — magnetomotorische Wirkungen. Mit diesen korrespondieren die im folgenden Kapitel zu besprechenden Induktionserscheinungen, die man beobachtet, wenn man einen Leiter in einem magnetischen Felde verschiebt — gleichsam Verschiebungen des elektrischen Fluidums.

Da das Innere eines stromdurchflossenen Solenoids von magnetischen Kraftlinien durchsetzt wird, so folgt, dass ein in dasselbe geschobener Stab aus (weichem) Eisen magnetisch wird — Elektromagnet. Um also einen stabförmigen Elektromagnet zu erhalten, wickelt man auf einen Kern aus weichem Eisen einen isolierten Draht und schickt durch diesen einen elektrischen Strom (s. Fig. 52). Unterbricht man den

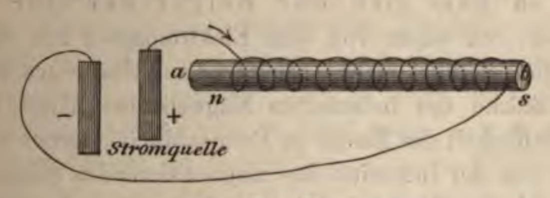


Fig. 52.

Strom, so verliert ab nicht seinen ganzen Magnetismus. Der remanente Magnetismus ist für gehärteten Stahl bedeutend grösser als für weiches Eisen.

Um starke Wirkungen (grosse Tragfähigkeit) zu erzielen, gibt man aus früher angegebenen Gründen den Elektromagneten vorzugsweise eine U- oder |_|-förmige Gestalt — Hufeisenmagnet. AB und CD in Fig. 53 (S. 100) sind die Schenkel, der diese verbindende Teil des Eisens wird Joch genannt. Man kann den Hufeisenmagnet auch als eine Kombination von zwei durch das Joch miteinander verbundenen Stabmagneten ansehen. Es müssen, damit bei A ein Nord- und bei

373802

B ein Südpol entsteht (oder umgekehrt), die beiden Schenkel im entgegengesetzten Sinne bewickelt werden. Um zu bestimmen, welche der beiden Endflächen eines Elektromagnets der Nord- und welche der Südpol ist, benutzt man folgende Regel: Man halte den Elektromagnet so, dass die Endfläche (bezw. die Endflächen) dem Beschauer zugewendet ist, dann ist dasjenige Ende der

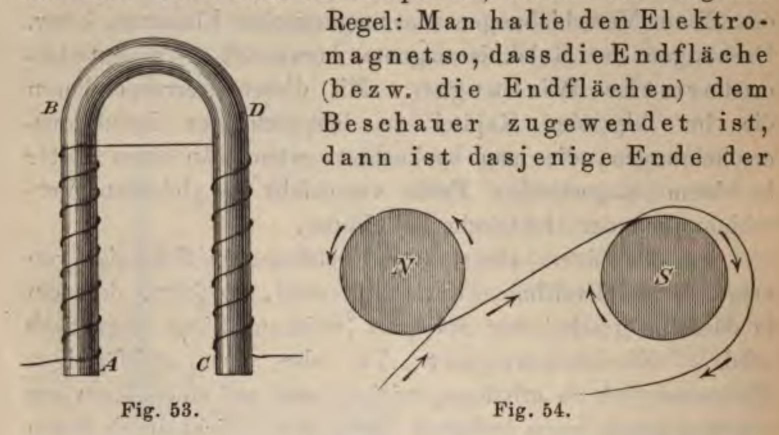


Fig. 53. Fig. 54.

Südpol, das vom Strome umflossen wird in dem Sinne, in dem sich der Zeiger der Uhr dreht (s. Fig. 54; wir sehen von dem Elektromagnet nur die Endflächen, die Schenkel stehen senkrecht zur Ebene des Papiers).

Die Stärke des induzierten Magnetismus hängt ab von der Beschaffenheit des Eisens (s. Permeabilität), ferner von dem Produkte aus der Intensität des magnetisierenden Stromes und der Anzahl der Drahtwindungen, d. h. von den Amperewindungen. Die magnetische Kraft wird also, wenn wir einen Strom von $\frac{1}{10}$ Amp. durch 1000 Windungen strömen lassen, dieselbe sein, wie wenn wir einen Strom von 1 Amp. in 100 Windungen um ein Stück weichen Eisens schicken[1]).

Die Tragfähigkeit eines Hufeisenmagnets, d. h. die Kraft, mit welcher der Anker von den beiden Polflächen angezogen wird, ist gleich

1) Wenn das Eisen des Elektromagnets von der Sättigungsgrenze noch ziemlich weit entfernt ist, so besteht Proportionalität zwischen den Amperewindungen (der magnetisierenden Kraft) und dem erzeugten Magnetismus, der Induktion.

$$\frac{Q B^2}{4\pi} \text{ Dynen,}$$

wo Q der Querschnitt eines Schenkels in Quadratcentimetern, B die Anzahl der auf 1 cm^2 der Endfläche kommenden Kraftlinien (die Induktion) ist.

Beispiel: Eine Induktion von 20000 C.G.S.-Einheiten kann man bei Elektromagneten gut erzielen; haben die Schenkel einen Querschnitt von 15 cm^2, so ist die Kraft, mit welcher der Anker festgehalten wird, gleich

$$\frac{15 . 20000^2}{4 . 3{,}14 . 981000} \text{ kg} = 487 \text{ kg.}$$

Der magnetische Kreis. Die Pole eines Hufeisenmagnets seien durch den vorgelegten Anker miteinander verbunden. Die Kraftlinien nehmen ihren Weg dann fast sämtlich durch Eisen[1]; sie treten am Nordpole aus, gehen durch den Anker zum Südpol, durchdringen den einen Schenkel, das Joch, den anderen Schenkel und gelangen zum Nordpol zurück. Wir haben einen geschlossenen magnetischen Kreis. Jede Kraftlinie denken wir uns von einer Röhre umgeben, durch die ein (sehr feines, unsichtbares) Fluidum strömt. Dass diese Anschauung vieles für sich hat, wurde schon früher hervorgehoben; auf Grund derselben kann man von einem Kraftlinienfluss reden, und es liegt nahe, diesen mit einem elektrischen Strome zu vergleichen. Die das Fluidum in den Röhren in Bewegung setzende Kraft wird passend als magnetomotorische Kraft bezeichnet. Diese hängt lediglich von der Anzahl der Amperewindungen ab.

Die Permeabilität hat für verschiedene Substanzen verschiedene Werte; es ist gerade so, als ob der Kraftlinienfluss in den verschiedenen Medien ungleiche Widerstände fände. Die Einführung des Begriffes „magnetischer Widerstand" hat also, auch wenn diesem Begriffe kein wirklicher Widerstand entspricht, gedankenökonomischen Wert. Was den Elektro-

1) Ein kleiner Teil der Kraftlinien geht, ohne seinen Weg durch den Anker zu nehmen, direkt von dem einen Schenkel (durch die Luft hindurch) zum anderen über, eine Erscheinung, die man als Streuung bezeichnet.

magnetismus anbelangt, so sei darauf hingewiesen, dass durch ein und dieselbe magnetisierende Kraft (dieselben Amperewindungen) bald eine grössere (Hufeisenmagnet aus weichem Eisen mit Anker), bald eine kleinere Anzahl von Kraftlinien (Solenoid ohne Eisenkern, Stab aus hartem Stahl) erzeugt bezw. in Bewegung gesetzt wird, dass also die Natur der Medien, durch welche die Kraftlinien ihren Weg nehmen müssen, von maßgebendem Einflusse ist (ähnlich wie bei der Elektrizität eine gegebene elektromotorische Kraft verschieden starke Ströme hervorrufen kann). Die besprochenen Analogien zwischen dem Kraftlinienflusse und dem elektrischen Strome führten zur Aufstellung eines Gesetzes für den magnetischen Kreis, das dem Ohmschen Gesetze ähnlich ist und den Erfahrungstatsachen Rechnung trägt. Es lautet:

Die Zahl der Kraftlinien in einem magnetischen Kreise ist gleich der magnetomotorischen Kraft dividiert durch den magnetischen Widerstand.

$$\text{Kraftlinienzahl} = \frac{\text{Magnetomotor. Kraft}}{\text{Magnet. Widerstand}}.$$

Zu diesem Gesetze kann man auch in der Weise gelangen, dass man von der Formel ausgeht, die für die Kraftlinienzahl gilt, wenn auf einen geschlossenen Eisenring eine Magnetisierungsspule von n Windungen gewickelt ist. Es sei l der Umfang eines Kreises, der innerhalb des Ringes parallel zu dessen Oberfläche verläuft (des mittleren Kreises in Fig. 55), Q der Querschnitt des Ringes. Es ist dann die gesamte Kraftlinienzahl K durch den Ausdruck gegeben

$$K = \frac{0{,}4\,\pi\,.\,n\,i}{\frac{l}{\mu\,.\,Q}}$$

(i = Stromstärke in Amp., μ = Permeabilität des Eisens).

Wäre μ die spezifische Leitfähigkeit des Eisens (in bezug auf die Elektrizität), so wäre $\frac{l}{\mu\,.\,Q}$ der Widerstand, den ein elektrischer Strom in dem Eisenringe findet. In dem Zähler steht das für die Stärke des erzeugten Magnetismus maßgebende Produkt n i, die Amperewindungszahl, und es ist daher gerechtfertigt, den Zähler als magnetomotorische Kraft zu bezeichnen.

Wird aus dem Ringe ein Stück ab von der Länge d herausgeschnitten, so wird der magnetische Widerstand bedeutend grösser, da die Permeabilität der Luft (ihre magnetische Leitfähigkeit) viel geringer ist als diejenige des Eisens. Der Nenner geht jetzt über in den Ausdruck $\frac{l-d}{\mu . Q} + \frac{d\,\mu_0}{Q}$ oder, da μ_0, die Permeabilität der Luft, gleich 1, in $\frac{l-d}{\mu . Q} + \frac{d}{Q}$.

Wenn man bei unserem Elektromagnet den Anker ein wenig von den Polflächen entfernt, wächst der magnetische Widerstand des Kreises bedeutend, da jetzt zwei Luftzwischenräume eingeschaltet sind und die magnetische Durchlässigkeit der Luft eine im Vergleich zum Eisen sehr geringe ist (s. S. 22). Infolgedessen sinkt die Zahl der Kraftlinien und damit die auf den Anker ausgeübte Anziehungskraft.

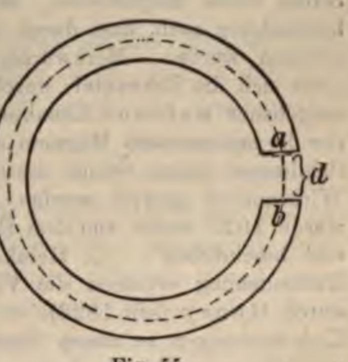


Fig. 55.

„In welchem Maße hierbei die Kraft abnimmt, lässt der folgende von Silvanus Thompson mitgeteilte Versuch erkennen: Einen mit 0,7 Amp. erregten Elektromagnet durchsetzten, wenn der Anker auflag, 14 190 Kraftlinien, wovon 12 506 durch den Anker gingen; bei einem Ankerabstand von 1 mm sank die Kraftlinienzahl auf 3786 bezw. 1552, bei einem Ankerabstand von 2 mm auf 2839 bezw. 1149." (Handbuch der Elektrot. XII, S. 61.) Man sieht auch, wie sehr die Streuung, in Prozenten der erzeugten Kraftlinien ausgedrückt, mit dem Ankerabstand zunimmt. Je grösser der Widerstand in der Hauptbahn (Elektromagnet, Anker) wird, um so stärker wird die Strömung in den Nebenbahnen (es sei an die Gesetze über Stromverzweigungen erinnert), um so grösser wird derjenige Teil der Kraftlinien, der nicht durch den Anker geht.

Ein Elektromagnet heisst polarisiert, wenn er einen permanenten Magnet enthält. So z. B. kann der Anker ein Dauermagnet sein — dieser wird dann je nach der Richtung des durch die Elektromagnetspule fliessenden Stromes ange-

zogen oder abgestossen —, oder die Kerne stehen auf einem Dauermagnet (es wird dann der durch den Dauermagnet in den Kernen induzierte Magnetismus durch den Strom verstärkt bezw. geschwächt). Polarisierte Elektromagnete finden bei Telegraphen- und Telephonapparaten vielfach Verwendung.

Geschichtliches. Die wichtige Entdeckung, dass jeder Strom Eisen magnetisiere, machte zuerst Arago (1820). Er beobachtete auch, dass durch einen Stromleiter Eisenfeilspäne angezogen werden. Merkwürdiger Weise vergingen noch 5 Jahre, „ehe sich die Erkenntnis durchrang, dass ein von Stromwindungen umgebener weicher Eisenkern zu einem Magneten gemacht wird, der die permanenten Magnete an Zugkraft übertrifft und der durch Schliessen bezw. Öffnen des Stromes nach Belieben in und ausser Wirksamkeit gesetzt werden kann. Ein solcher Elektromagnet wurde 1825 zuerst von dem Engländer W. Sturgeon hergestellt und beschrieben". (C. Heinke, l. c. S. 415.) Eine eingehende Untersuchung erfuhren die Verhältnisse der Elektromagnete erst durch Henry (seit 1828). — Joule gelangte auf Grund seiner Untersuchungen zu einem Standpunkte (1839), dem die Kreislaufvorstellung zu Grunde liegt. Aber erst nahezu ein halbes Jahrhundert später wurde diese Vorstellung von Rowland und Bosanquet in die allgemeine Wissenschaft eingeführt und durch die englische Schule der Elektrotechniker folgerichtig ausgebaut (Kapp).

Ampères Theorie des Magnetismus. Ampère nimmt an, dass der Magnetisierungsprozess in einer Drehung bereits (in gewöhnlichem Eisen) vorhandener magnetischer Moleküle bestehe. Der Magnetismus des Moleküls rührt von einem elektrischen Strome her, der in ihm beständig kreist; das Molekül ist also ein von einem Strome umflossener Leiter. Auf diese Weise werden die magnetischen Erscheinungen auf elektrische zurückgeführt. Vor der Magnetisierung sind die Kreisströme ungerichtet; durch den Magnetisierungsstrom erhalten diese Ströme eine gemeinsame Richtung (vergl. Elektrodynamik).

Achtes Kapitel.

Einwirkung zweier Ströme aufeinander: Elektrodynamik.

1. **Anziehung und Abstossung zweier Stromleiter.** Ein von einem Strome durchflossener Leiter verhält sich ähnlich wie ein Magnet. Wie dieser hat er ein magnetisches Feld und übt auf Magnetpole Kräfte aus. Ein beweglich aufgehängtes Solenoid dreht sich wie eine Kompassnadel so lange, bis seine Achse in den magnetischen Meridian fällt, und es wirkt auf Eisen magnetisierend. Da nun zwei Magnetpole sich gegenseitig anziehen oder abstossen, so liegt die Frage nahe, ob dies auch von stromdurchflossenen Drähten gilt. Diese Frage wurde von Ampère eingehend untersucht; die Arbeiten führten zur mathematischen Ableitung des Grundgesetzes der Elektrodynamik über die Kraftwirkung zwischen zwei beliebig gelegenen stromdurchflossenen Leiterstücken (1823).

Nähert man der Seite *ab* des Drahtrechtecks in Fig. 51 (Seite 98) einen geraden stromdurchflossenen, mit *ab* parallel laufenden Leiter, so beobachtet man, falls nicht ein zu schwacher Strom benutzt wird, eine Drehung des Rechtecks, und zwar erfolgt Anziehung oder Abstossung, je nachdem die beiden parallelen Ströme gleich gerichtet, z. B. beide von oben nach unten fliessen, oder entgegengesetzt gerichtet sind.

Zwei parallele, gleich gerichtete Ströme ziehen sich gegenseitig an; zwei parallele, entgegengesetzt gerichtete Ströme stossen einander ab.

Da auf den beweglichen Stromkreis (das Rechteck in Fig. 51) der Erdmagnetismus einwirkt, der den Stromkreis in einer bestimmten Lage festzuhalten sucht[1]), so gelingen die

1) Die Lage ergibt sich, wenn man beachtet, dass sich das stromdurchflossene Rechteck ähnlich verhält wie ein kleiner, seine Ebene senk-

Versuche mit schwächeren Strömen besser, wenn statt eines einfachen Drahtrechtecks ein sogenannter **astatischer Stromkreis** benutzt wird (siehe Fig. 56). Auf die beiden Hälften wirkt der Erdmagnetismus in gleichem Sinne, da aber die Kräfte auf verschiedenen Seiten der Drehungsachse angreifen, so heben sich die Wirkungen des Erdmagnetismus auf die beiden Stromkreise auf (gerade wie bei einem astatischen Nadelpaar).

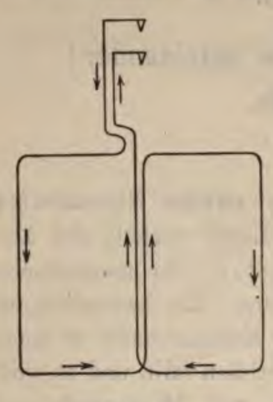


Fig. 56.

Um bei geringerer Stromstärke die Kraft, mit der der bewegliche Leiter angezogen oder abgestossen wird, zu vergrössern, benutzt man als festen Stromkreis einen rechteckigen Rahmen mit vielen neben- und übereinander liegenden Windungen. Der Rahmen wird einer der vertikalen Seiten des beweglichen Stromkreises so genähert, dass eine der beiden grossen Seiten mit ersterer parallel läuft.

Wenn man durch eine Drahtspirale einen Strom schickt, so ziehen sich die parallel laufenden Drahtstücke gegenseitig an, und die Spirale hat das Bestreben sich zu verkürzen.

Ströme, die nicht parallel sind, nennt man gekreuzte Ströme, mögen die betreffenden Stromleiter in einer oder in verschiedenen Ebenen liegen. Ampère fand folgenden Satz:

Zwei gekreuzte Ströme suchen sich so zu stellen, dass sie parallel laufen und der Strom in beiden dieselbe Richtung hat.

Um diesen Satz experimentell nachzuweisen, bedient man sich wieder des Ampèreschen Gestelles und des astatischen Stromkreises. Nähert man der unteren Seite des Rechtecks in Fig. 51 einen horizontal laufenden Draht, durch den ein kräftiger Strom fliesst, so dass er mit der Seite des Rechtecks

---

recht durchsetzender Magnet. Es stellt sich also **senkrecht** zum magnetischen Meridian.

einen beliebigen Winkel bildet, so wird der bewegliche Stromkreis in einer dem mitgeteilten Gesetze entsprechenden Weise gedreht.

Sind *a b* und *c d* in Fig. 57 zwei isolierte, aufeinander liegende Drähte, in denen Ströme in den angedeuteten Richtungen fliessen, so wirken *a f* und *d f* anziehend aufeinander, ebenso die Ströme in *f c* und *f b* (beide fliessen vom Kreuzungspunkte *f* weg). Dagegen stossen sich die Ströme in *a f* und *f c* ab, ebenso die Ströme in *d f* und *f b* (der eine fliesst zum Kreuzungspunkte hin, der andere von diesem Punkte weg). Die vier Kräfte wirken, wenn einer der Leiter sich um *f* drehen kann, in demselben Sinne.

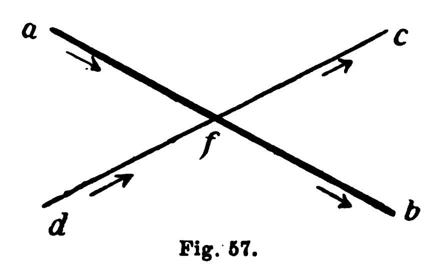


Fig. 57.

Stehen die beiden Leiter *a b* und *c d* aufeinander senkrecht (s. Fig. 58), so wirken die Ströme *e a* und *c d* anziehend aufeinander; beide fliessen nämlich von dem Kreuzungspunkte *e* weg. Die betreffende Kraft wird in der Figur durch den Pfeil 2 versinnlicht. Das Stromstück *e b* übt auf *c d* eine Abstossung aus (Pfeil 1). Beide Kräfte suchen *c d* in der Ebene des Papiers senkrecht zu *a b* zu verschieben.

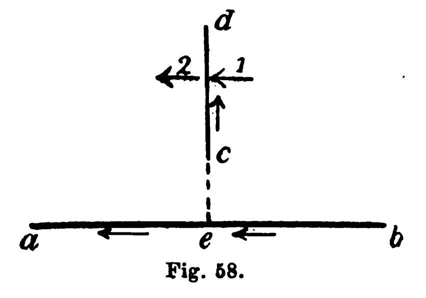


Fig. 58.

2. **Anwendungen.** a) Hörnerblitzableiter. Die elektrodynamischen Kräfte, welche gekreuzte Ströme aufeinander ausüben, hat man für die Konstruktion einer Blitzschutzvorrichtung verwertet. Es seien *a b* und *c d* in Fig. 59 (S. 108) zwei feststehende Drähte, *e f* ein diese verbindender, sehr leicht verschiebbarer Leiter. Wir haben also zwei Kreuzungspunkte, nämlich *e* und *f*. Für *e* findet man, dass *e f* von *a b* nach

oben hingetrieben wird (Abstossung); in bezug auf *f* haben beide Ströme im Vergleich zu *e* die entgegengesetzte Richtung; das bedeutet eine zweimalige Umkehrung der Kraft, *cf* wirkt also ebenfalls auf *ef* abstossend. *ef* bewegt sich mithin in der Richtung des Pfeiles *v*. Ein Hörnerblitzableiter besteht nun aus zwei hornartig gekrümmten Drähten (*A* und *B* in Fig. 60),

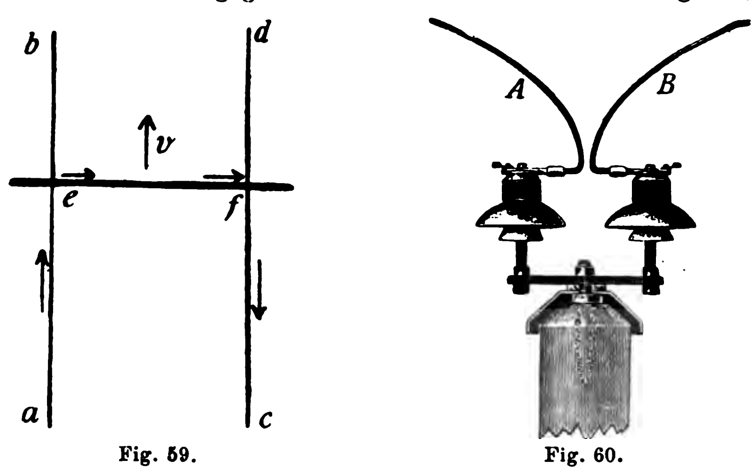


Fig. 59. Fig. 60.

die auf Isolatoren befestigt sind. Der eine dieser Drähte wird mit einer Leitung des Netzes, der andere mit der Erde verbunden. Wird durch den Einfluss der atmosphärischen Elektrizität die Potentialdifferenz zwischen der Leitung und der Erde eine sehr grosse, so entsteht an der Stelle, wo der Abstand zwischen den beiden Hörnern am kleinsten ist, ein Funkenstrom bezw. ein Lichtbogen, durch den auch Elektrizität, welche die Dynamomaschine liefert, zur Erde abfliesst. Der Lichtbogen steigt von selbst empor und zerreisst schliesslich (hierbei spielt auch das Emporsteigen der heissen Luft eine Rolle).

b) Das Elektrodynamometer wurde von Weber i. J. 1841 konstruiert. Es wird für die Messung der Stromstärke und der Leistung (Wattmeter), besonders bei Wechselströmen, benutzt. Das Instrument besteht aus einer festen und einer dreh-ngeordneten Spule, deren Ebenen, bevor man die Messung mt, aufeinander senkrecht stehen müssen. Schickt man

durch die beiden Spulen denselben Strom i, von dem wir hier annehmen wollen, dass er ein Gleichstrom sei, so wirkt auf die bewegliche Spule eine Kraft, die proportional dem Quadrate der Stromstärke ist. Die Grösse der elektrodynamischen Kraft nämlich, mit der zwei Ströme i_1 und i_2 aufeinander einwirken, ist proportional dem Produkte der beiden Stromstärken, kann also gleich $C.i_1.i_2$ gesetzt werden. In unserem Falle ist $i_1 = i_2 = i$, mithin $C.i_1.i_2 = C.i^2$. Die Kraft sucht die bewegliche Spule so lange zu drehen, bis die Windungsebenen der beiden Spulen zusammenfallen. Wirkt dieser Kraft die Spannung einer Spiralfeder oder die Torsionskraft eines Metallfadens entgegen, so dreht sich die Spule so lange, bis die mit dem Drehungswinkel zunehmende Gegenkraft gleich ist der elektrodynamischen Kraft.

In Fig. 61 ist ein Elektrodynamometer von Siemens und Halske dargestellt, das für die Messung der Leistung eines Stromes eingerichtet ist. An einem mit Fussschrauben versehenen Holzgestell ist eine feste Spule mit zwei übereinander liegenden Wickelungen angebracht; die eine (die innere) aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes ist für starke Ströme, die andere aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes für schwache Ströme bestimmt. Die vier freien Drahtenden sind an vier auf der Grundplatte stehenden Klemmen befestigt. — Auf einen rechteckigen Rahmen, dessen Ebene senkrecht auf den Windungsebenen der festen Spulen steht, ist ein sehr langer, dünner Draht gewickelt. Die Enden der beweglichen Spule sind mit zwei schwachen Spiralfedern verbunden und diese durch Drähte mit den beiden mittleren Klemmen. Der Rahmen ist an einem Faden aufgehängt.

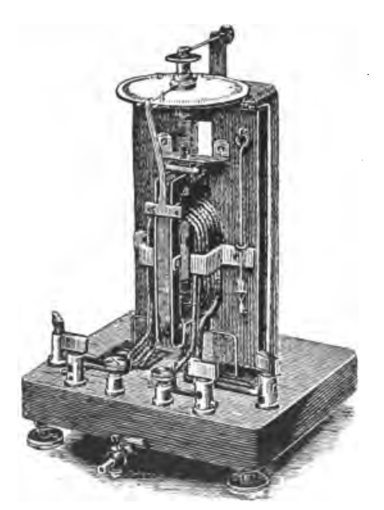


Fig. 61.

Eine der beiden festen Spulen wird in den Hauptstrom eingeschaltet (wie ein Amperemeter). Die Enden der beweglichen Spule verbindet man mit den Klemmen desjenigen Apparates, dessen Energieverbrauch man messen will (wie ein Voltmeter). In die Zuleitung legt man eventuell noch einen Vorschaltwiderstand, um den Nebenstrom abzuschwächen. Der Widerstand in dem Vorschaltwiderstand und in der beweglichen Spule betrage W Ohm, die Spannung an den Klemmen des Apparates, dessen Energieverbrauch bestimmt werden soll, sei E Volt; dann fliesst durch die bewegliche Spule ein Strom von $\frac{E}{W}$ Amp. Die elektrodynamische Kraft[1]) ist also gleich $C . J . \frac{E}{W} = \frac{C}{W}$. Leistung. Die obere Spiralfeder dient zugleich zur Messung der auf die bewegliche Spule wirkenden Kraft. Zu dem Zwecke ist dieselbe an dem sogen. Torsionsknopfe befestigt. Dieser ist um eine durchbohrte vertikale Achse drehbar und trägt einen Zeiger, der über einer in Bogengrade eingeteilten Skala spielt. An einem leichten Metallstreifen, der an dem Rahmen der beweglichen Spule befestigt ist, befindet sich ein zweiter Zeiger. Die beiden erwähnten Zeiger müssen, ehe man zur Messung schreitet, auf den Nullpunkt der Skala hinweisen. Fliesst Strom durch die beiden Spulen, so wird die bewegliche Spule und mit ihr natürlich auch der an dem Metallstreifen befestigte Zeiger abgelenkt. Man dreht nun den Torsionsknopf so lange, bis der Rahmenzeiger wieder genau auf den Nullpunkt einspielt. Durch diese Drehung entstehen in der mit dem Knopfe fest verbundenen Spirale elastische Spannungen (Torsionskraft), welche die bewegliche Spule in die Anfangslage zurückzutreiben suchen. Je mehr man den Torsionsknopf dreht, um so grösser wird die der elektrodynamischen Kraft entgegenwirkende Spannung. Halten sich die beiden Kräfte das Gleichgewicht, so stehen die Windungsebenen der beiden Spulen wieder senkrecht aufein-

[1]) Messung eines Wechselstromes wird später behandelt.

Der Winkel, um den man den Torsionsknopf drehen muss, ist nicht der sogen. Torsionswinkel, sondern letzterer ist die Differenz zwischen dem ersteren und dem Winkel, um den die bewegliche Spule abgelenkt worden ist.

Nennt man den Torsionswinkel α, und ist K eine Konstante (= Torsionskraft, wenn $\alpha = 1^0$), so ist die Torsionskraft gleich $K\alpha$. Daher besteht die Gleichung

$$K\alpha = C \,.\, J \,.\, \frac{E}{W} = \frac{C}{W} \,.\, \text{Leistung oder}$$

$$\text{Leistung} = \frac{K \,.\, W}{C} \,.\, \alpha,$$

d. h. die Leistung ist proportional dem Torsionswinkel.

c) Bei dem Quecksilberunterbrecher von Margot taucht eine lockere Kupferdrahtspirale mit vertikaler Achse mit ihrem abwärts gebogenen unteren Ende in das den Boden eines Gefässes bedeckende Quecksilber. In dieses taucht ein gerader Kupferdraht als zweite Elektrode. Fliesst ein Strom durch die Spirale, so verkürzt sie sich, und das untere Ende tritt aus dem Quecksilber heraus. Der Strom wird unterbrochen und kurze Zeit darauf wieder geschlossen, da die Spirale sich wieder ausdehnt.

Neuntes Kapitel.

Die Induktionserscheinungen.

---

1. **Magnetelektrische Induktion** (Erzeugung elektrischer Ströme durch Magnete). Im siebenten Kapitel haben wir Kräfte kennen gelernt, welche von strömender Elektrizität auf ruhende Magnete ausgeübt werden. Jetzt beschäftigen wir uns mit der Frage, ob nicht auch ein sich bewegender Magnetpol auf ruhende (neutrale) Elektrizität wirkt.

Wird ein Leiter, z. B. ein geradliniger Draht, in einem magnetischen Felde so verschoben, dass er Kraftlinien schneidet, so wird in ihm eine elektromotorische Kraft erzeugt, d. h. es wird positive Elektrizität nach dem einen und negative nach dem anderen Ende hingetrieben. Werden die beiden Enden

des Leiters durch einen Draht oder sonstwie leitend miteinander verbunden, so gleicht sich die durch die Bewegung erzeugte Potentialdifferenz, die induzierte Spannung, aus, und man erhält einen elektrischen Strom, einen sogen. Induktionsstrom.

Wir wollen jetzt annehmen, dass ein geschlossener Leiter, ein Drahtring, in einem magnetischen Felde bewegt wird. Das Feld werde durch einen permanenten Magnetstab NS (s. Fig. 62) erzeugt. In einer bestimmten Lage A_1, die wir als Anfangslage wählen, umschliesst der Ring eine gewisse Anzahl von Kraftlinien. Dreht man den Ring um seine Achse, so wird, wie man experimentell nachweisen kann, in ihm keine elektromotorische Kraft induziert[1]). Der Ring werde sich selbst parallel, ohne dass seine Achse ihre Richtung ändert, nach links verschoben, bis seine Ebene mit der Mittelebene des Magnets zusammenfällt (Lage A_3). Auf diesem ganzen Wege nimmt die Zahl der durch die Ringebene gehenden Kraftlinien zu; denn erst in der Lage A_3 durchdringen alle vorhandenen Kraftlinien (im Innern des Magnetstabes) die Ringebene. Während der angedeuteten Bewegung wird in dem Ringe ein Strom induziert, und zwar fliesst dieser immer in demselben Sinne. Verschiebt man den Ring noch weiter nach links, so nimmt die Zahl der seine Ebene durchsetzenden Kraftlinien ab, und man findet, dass jetzt der Induktionsstrom im entgegengesetzten Sinne zirkuliert wie eben.

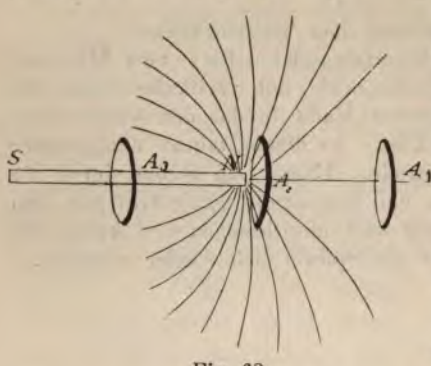


Fig. 62.

Auf Grund der Versuche gelangt man zu dem Resultate, dass das Entstehen der elektromotorischen Kraft

1) Um die Induktionsströme nachzuweisen (siehe später), müsste man den Ring (durch einen Querschnitt) aufschneiden, die Endflächen etwas voneinander trennen und sie mit einem Galvanoskop verbinden.

der Veränderung der Kraftlinienzahl, die den Ring durchsetzen, zuzuschreiben ist.

Wenn man den Ring aus der Lage A_2 in seiner eigenen Ebene (Vertikalebene) nach oben oder unten etwas verschiebt, so ändert sich die Zahl der durch die Ringöffnung gehenden Kraftlinien kaum, so dass also die induzierte elektromotorische Kraft sehr klein ist. Man sieht also, dass die Entfernung des Ringes von dem Pole allein nicht für die Induktion maßgebend ist [1]).

Man findet, dass die erzeugte elektromotorische Kraft um so grösser wird, je rascher die Bewegung erfolgt, je schneller sich also die Anzahl der Kraftlinien ändert, die durch die von dem Ringe eingeschlossene Ebene gehen.

Die Stärke des induzierten Stromes hängt von der Grösse der ins Leben gerufenen elektromotorischen Kraft und dem Widerstande im Stromkreise ab. Bestimmte Angaben kann man nur über die Grösse der induzierten elektromotorischen Kraft machen.

Wir wollen uns jetzt mit der Frage beschäftigen, wie man die Richtung des induzierten Stromes vorausbestimmen kann. Wir gehen aus von dem Energiesatze (Satz von der Erhaltung der Energie). Ist der bewegte Leiter ein geschlossener Ring, so wird dieser durch den induzierten Strom erwärmt, es wird elektrische Energie in Wärme umgesetzt. Für diese elektrische Energie bezw. Wärme muss ein Äquivalent vorhanden sein. Da das magnetische Feld [2]) dadurch, dass wir in einem Leiter, der bewegt wird, Ströme induzieren, nicht geschwächt wird, so kann nur mechanische Arbeit in Betracht kommen. Nun wissen wir, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem magnetischen Felde befindet, Kräfte ausgeübt werden. Wird also unser Ring in der Nähe des Poles N so bewegt, dass in ihm ein Strom induziert wird, so wird er von N entweder angezogen oder abgestossen. Wie leicht einzusehen, muss die Richtung des

---

1) Bei einem geraden Leiter tritt dagegen der Maximalwert der Spannung ein, wenn er an der Polmitte vorbeigeht und konstante Geschwindigkeit angenommen wird (man vergl. die Berechnung auf S. 115).

2) In diesem ist eine gewisse Energie aufgespeichert.

Induktionsstromes eine solche sein, dass der Ring von dem Pole während der Annäherung abgestossen und während der Entfernung (z. B. Verschiebung aus der Lage A_2 nach rechts) angezogen wird. Wäre es nämlich anders, so würde man nicht nur keine Arbeit (als Äquivalent für die erzeugte elektrische Energie) aufzuwenden haben, man würde vielmehr mechanische Arbeit (ausser der elektrischen Energie) gewinnen.

Die Richtung des induzierten Stromes ist eine solche, dass er durch seine elektromagnetische Rückwirkung die Bewegung, der er seine Entstehung verdankt, zu hemmen sucht. (Gesetz von Lenz, das auch für die Volta-Induktion Gültigkeit hat.)

Mit Hülfe dieses Gesetzes soll zunächst für einen geraden Leiter die Richtung des induzierten Stromes bestimmt werden. Es seien S_1 und S_2 in Fig. 63 [1]) zwei in einer horizontalen Ebene (auf dem Tische) liegende, parallel laufende Metall-

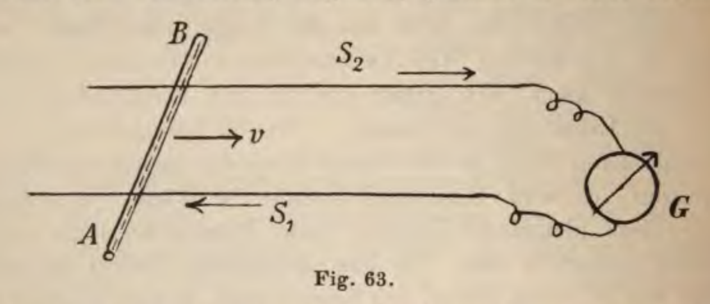


Fig. 63.

schienen, die mit einem Galvanoskop verbunden sind. Der Leiter AB schneide die Schienen rechtwinkelig und sei leicht beweglich (Metallrohr). Die Vorrichtung befinde sich in einem homogenen magnetischen Felde, dessen Kraftlinien senkrecht zu der Ebene der Schienen (des Tisches) verlaufen mögen, und zwar von oben nach unten (von der Decke des Zimmers nach dem Fussboden hin). Bewegt man den Leiter sich selbst parallel in der Richtung des Pfeiles v, so dass der Kontakt mit den Schienen bestehen bleibt, so schneidet er die Kraftlinien senkrecht. Bei den gemachten Annahmen muss

1) Nach Kapp, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom.

der Induktionsstrom die angedeutete Richtung haben. Nehmen wir nämlich für einen Augenblick an, *G* (Fig. 63) sei eine Stromquelle, die in der angenommenen Richtung Strom in den Leiter sendet. Es würde dann nach der früher mitgeteilten Regel (s. S. 97) auf *AB* eine Kraft wirken, die den Leiter von *G* wegzutreiben sucht. Bewegt man also *AB* in der Richtung *v*, so ist bei der Stromrichtung der Zeichnung eine Kraft vorhanden, welche die Bewegung zu hemmen sucht, wie es sein muss.

Was den Drahtring anbelangt, so ist zu beachten, dass man sich einen Kreisstrom durch eine die Ebene des Kreises ausfüllende Eisenscheibe ersetzt denken kann, die auf der einen Seite Nord-, auf der anderen Seite Südmagnetismus enthält. Nähert man den Ring aus der Lage A_1 dem Nordpole *N* (Fig. 62), so muss die *N* zugewendete Seite der gedachten Scheibe ein Nordpol sein (damit Abstossung erfolgt). Die Antwort auf die Frage nach der Richtung des induzierten Stromes kann daher mit Hülfe der Regel über die Polarität bei einem Elektromagnet gegeben werden. Man findet, dass der Strom in der vorderen (vom Nordpol aus gesehen, der rechten) Hälfte des Ringes von unten nach oben fliesst.

Berechnung der induzierten elektromotorischen Kraft. a) Es habe *AB* in Fig. 63 eine Länge von $\mathfrak{l}$ cm, die Geschwindigkeit, mit der der Leiter verschoben wird, betrage v cm (pro Sek.). Dann bestreicht *AB* in 1 Sekunde eine Fläche (ein Rechteck) von $\mathfrak{l} \cdot v$ cm². Ist die konstante Feldstärke in der Fläche gleich $\mathfrak{H}$, d. h. gehen $\mathfrak{H}$ Kraftlinien durch 1 cm², so schneidet unser Leiter in der betrachteten Zeit (1 Sekunde) im Ganzen $\mathfrak{l} \cdot v \cdot \mathfrak{H}$ Kraftlinien. Diese Zahl wollen wir mit K bezeichnen:

$$K = \mathfrak{l} \cdot v \cdot \mathfrak{H}.$$

b) Nennen wir die zu berechnende elektromotorische Kraft e und die zugehörige Stromstärke, in Ampere ausgedrückt, i [1]), so ist die durch die Bewegung gewonnene elektrische Energie gleich e.i Watt. Um sie in Erg (C.G.S.-Einheiten

---

1) Über den Widerstand im Stromkreise brauchen wir keine Annahme zu machen, da i, wie wir sehen werden, später wegfällt.

der Arbeit) zu erhalten, müssen wir e.i mit 10^7 multiplizieren. Also ist die erzeugte elektrische Energie

$$A = e.i.10^7 \text{ Erg.}$$

c) Dieser Energie muss die mechanische Arbeit gleich sein, die man während der Bewegung des Leiters[1]) zu verrichten hat. Wir wissen nun, dass auf einen Leiter von der Länge $\mathfrak{l}$ cm, in dem ein Strom von i' C.G.S.-Einheiten fliesst., und der sich (ganz) in einem homogenen magnetischen Felde von der Stärke $\mathfrak{H}$ befindet, eine Kraft P wirkt, die gleich $\mathfrak{l}.i'.\mathfrak{H}$ Dynen ist

$$P = \mathfrak{l}.i'.\mathfrak{H} \text{ Dynen.}$$

Da eine C.G.S.-Einheit der Stromstärke gleich 10 Amp., so ist in unserem Falle $i' = \frac{1}{10} i$. Mithin

$$P = \mathfrak{l}.\frac{i}{10}.\mathfrak{H} \text{ Dynen.}$$

Diese Kraft (Widerstand gegen die Bewegung) ist während der Verschiebung des Leiters zu überwinden.

Da der Weg gleich v cm ist, so ist die zu leistende Arbeit

$$A' = (\mathfrak{l}.\frac{i}{10}.\mathfrak{H}).v \text{ Erg.}$$

Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie muss A gleich A' sein. Mithin

$$e.i.10^7 = \mathfrak{l}.\frac{i}{10}.\mathfrak{H}.v \text{ oder}$$

$$e = \frac{\mathfrak{l}.\mathfrak{H}.v}{10^8} = \frac{K}{10^8} \text{ Volt}^{2)}.$$

S c h n e i d e t a l s o u n s e r L e i t e r i n 1 S e k u n d e 10^8 K r a f t l i n i e n , s o i s t d i e i n d u z i e r t e e l e k t r o m o t o r i s c h e K r a f t g l e i c h 1 V o l t .

Beispiel: Es sei $\mathfrak{l} = 10$ cm, $v = 20$ cm, $\mathfrak{H} = 4000$. Es ist

$$K = \mathfrak{l}.\mathfrak{H}.v = 10.20.4000 = 8.10^5$$

und

$$e = \frac{8.10^5}{10^8} = 8 \text{ Millivolt.}$$

---

1) An die Reibung ist hierbei natürlich nicht gedacht.

2) Die Einheit der elektromotorischen Kraft im C.G.S.-System ist gleich 1 Hundertmillionstel Volt. Näheres siehe im Anhange.

Handelt es sich um eine Drahtwindung, so hat man für K die Änderung der Kraftlinienzahl während 1 Sekunde zu setzen. Wird also die Ebene der Windung vor Beginn der Bewegung von m Kraftlinien und 1 Sekunde später von m' Kraftlinien durchsetzt, so ist K = m'—m. Ist die Differenz negativ, so bedeutet dies, dass der induzierte Strom in der entgegengesetzten Richtung fliesst, wie wenn m'—m das positive Vorzeichen hat.

Wird eine Drahtspule oder eine Drahtrolle in einem magnetischen Felde bewegt, so wird in jeder Windung eine elektromotorische Kraft induziert; die einzelnen elektromotorischen Kräfte addieren sich.

Bei Versuchen über die Induktionserscheinungen bedient man sich meistens einer Drahtspule aus vielen Windungen, deren Enden mit einem Galvanoskop verbunden sind. Es genügt ein Instrument, bei dem ein Strom von $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{1}{10000}$ Amp. einen deutlichen Ausschlag hervorruft. Nähert man die Spule dem Nordpol (siehe Fig. 64), so schlägt der Zeiger des Galvanoskops nach einer bestimmten Seite aus, sagen wir nach links; entfernt man die Spule von dem Nordpol, so erfolgt der Ausschlag nach der rechten Seite, ebenso wenn man die Drahtrolle dem Südpol nähert.

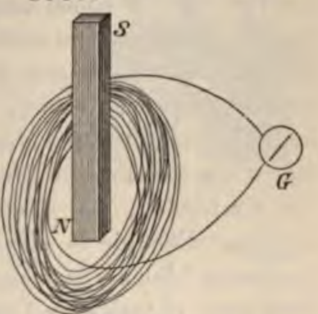


Fig. 64.

Wie schon hervorgehoben wurde, ist nicht die Bewegung des Leiters das Wesentliche, wenn es sich um die Erzeugung von Induktionsströmen handelt, sondern das Durchschneiden der Kraftlinien bezw. die Änderung der Kraftlinienzahl. Wenn man daher die eben beschriebenen Versuche in der Weise abändert, dass man der feststehenden Spule den Magnet nähert (s. Fig. 65), bezw. von ihr entfernt, so werden elektromotorische Kräfte induziert.

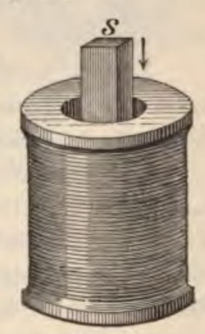


Fig. 65.

Für derartige Versuche eignet sich sehr gut die sekundäre Spule eines sogen. Schlittenapparates (s. Induktorium) in Verbindung mit einem Zeigergalvanoskop von Hartmann und Braun (s. Messinstrumente).

Endlich kann man, ohne dass man die Spule oder den Magnet bewegt, Induktionsströme erzeugen. Zu dem Zwecke legt man den Magnetstab in die Spule und nähert einem der beiden Pole (bezw. entfernt von ihm) einen Anker, oder man benutzt einen Elektromagnet, den man ein- und ausschaltet.

Die Annäherung des weichen Eisens hat zur Folge, dass ein Teil der Kraftlinien von seinem Wege abgelenkt wird; da sich ausserdem der magnetische Widerstand verringert, so ändert sich die Zahl der durch eine Windungsebene gehenden Kraftlinien.

Wirbelströme (auch Foucaultsche Ströme genannt (s. S. 123). Mit diesem Namen bezeichnet man die in körperlichen Leitern, Scheiben, Cylindern u. dergl., durch Induktion erzeugten Ströme. Wir wählen als Beispiel eine runde Kupferscheibe, die in einem magnetischen Felde rotiert, und zwar mögen die Kraftlinien senkrecht auf der Oberfläche der Scheibe stehen. Man kann sich die Scheibe aus dreieckigen Streifen zusammengesetzt denken, deren Spitzen alle im Mittelpunkte der Scheibe und deren Grundlinien Stücke der Peripherie sind. Macht die Scheibe eine Umdrehung, so schneidet jeder Streifen die Kraftlinien, so dass elektromotorische Kräfte induziert werden. Für die in einem herausgegriffenen Streifen erregte Spannung bilden die benachbarten Streifen Ausgleichsbahnen. Man kann experimentell nachweisen, dass zwischen der Achse und dem Umfange der rotierenden Scheibe eine Potentialdifferenz besteht.

Ebenso werden Ströme induziert, wenn sich in der Nähe eines körperlichen Leiters ein Magnetpol bewegt oder eine Magnetnadel Schwingungen ausführt.

Die Wirbelströme haben wie alle Induktionsströme nach dem Lenzschen Gesetze eine solche Richtung, dass sie die Bewegung, der sie ihre Entstehung verdanken, zu hemmen suchen. Schwingt also ein Magnetstab (oder eine Magnetnadel) über einer ruhenden Metallscheibe oder innerhalb einer ruhenden Metallhülse, so kommt er früher zur Ruhe, als wenn er nur die Reibungs-

widerstände (in der Luft etc.) zu überwinden hätte, eine Erscheinung, die man mit dem Namen Dämpfung bezeichnet und die bei den Messapparaten Verwendung findet. Bei den Dynamomaschinen, Elektromotoren und Transformatoren bedingen die in den verschiedenen Metallteilen induzierten Wirbelströme Energieverluste, ausserdem bewirken sie eine unter Umständen beträchtliche Erwärmung der Maschine (näheres siehe Dynamomaschinen).

Versuche. Man lässt eine Kupferplatte Schwingungen ausführen; bei jedem Hin- und bei jedem Hergange des Pendels (Fig. 66) geht die Scheibe durch einen engen Spalt zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets hindurch. Ist das magnetische Feld sehr stark, so bleibt das herabfallende Pendel, wenn es durch die Gleichgewichtslage hindurch geht, plötzlich stecken, wie wenn der Zwischenraum zwischen den Polen mit einer zähflüssigen Masse angefüllt wäre (v. Waltenhofens Pendel).

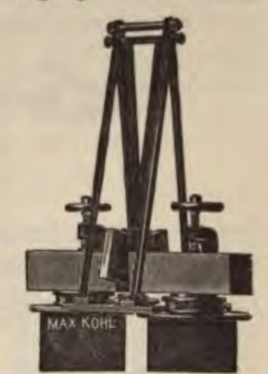
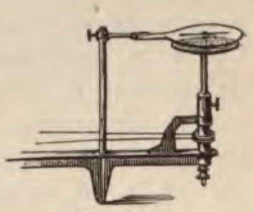


Fig. 66.

Eine frei schwebende Magnetnadel über einer rotierenden Kupferscheibe (s. Fig. 67) wird durch diese letztere gleichfalls in Drehung versetzt. (Wenn der Magnet die Scheibe festzuhalten sucht, Aktion, so sucht die Scheibe den Magnet in Rotation zu versetzen, Reaktion. Das Festhalten ist, da die Scheibe weiter gedreht wird, nicht möglich, mithin muss der Magnet der Bewegung der Scheibe folgen.) Die beschriebene Erscheinung nannte Arago „Rotationsmagnetismus“. Bei dem in Fig. 67 abgebildeten Apparate befindet sich die Spitze, auf der die Magnetnadel ruht, auf einer verstellbaren Glasscheibe; diese verhindert zugleich, dass Luftströmungen, die infolge der Rotation der Metallscheibe entstehen, eine Bewegung der Nadel verursachen.


Fig. 67.

2. **Voltainduktion.** Wie wir gesehen haben, wird jeder stromdurchflossene Leiter von Kraftlinien umgeben. Da man also auch mittels eines elektrischen Stromes allein ein Feld erzeugen kann, so muss man in einem Leiter, der sich in

der Nähe eines zweiten stromdurchflossenen Leiters befindet, elektrische Ströme ohne Zuhülfenahme eines Magnets induzieren können. Es seien in Fig. 68 *a b* und *c d* zwei lange, parallellaufende Drähte. Der Draht *ab*, den man die **primäre Leitung** nennt, sei mit einer Stromquelle *B* verbunden.

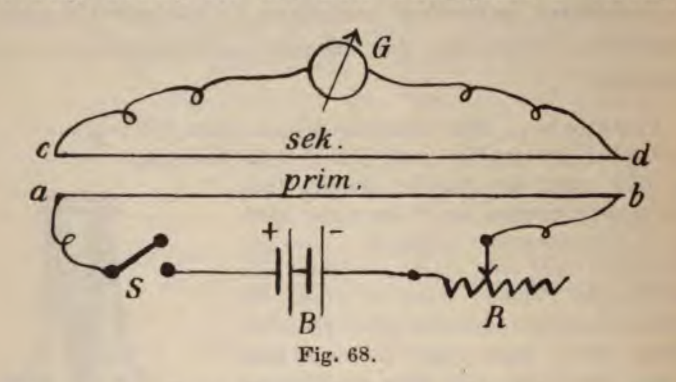


Fig. 68.

Damit wir den Strom bequem öffnen und schliessen können, sei in den Stromkreis ein Ausschalter *S* gelegt; der Kurbelrheostat *R* ermögliche endlich eine schnelle Änderung der Stromstärke. Wird der Ausschalter geschlossen, so stürzt sich die Elektrizität in den primären Draht, und es wird in sehr kurzer Zeit das primäre Feld erzeugt. Ein Teil der erzeugten (kreisförmigen) Kraftlinien schneidet die **sekundäre Leitung** rechtwinkelig. Ist *c d* mit einem empfindlichen Galvanoskop *G* verbunden, so zeigt uns dieses im Momente, in dem der primäre Stromkreis geschlossen wird, einen Strom an (↓)[1]. Der sekundäre Strom dauert natürlich nur so lange, bis sich in *a b* ein stationärer elektrischer Zustand ausgebildet hat, also nur sehr kurze Zeit. Drehen wir den Hebel des Ausschalters in die in der Figur gezeichnete Lage, so entsteht in *c d* ein neuer Stromstoss (↑). Drittens werden in der sekundären Leitung Ströme induziert, wenn wir mittels des Rheostates die Stärke des primären Stromes vergrössern (↓) oder ver-

1) Ein Strom, der in der einen Richtung fliesst, etwa von links nach rechts, werde bezeichnet durch ↑ und ein Strom in der entgegengesetzten Richtung durch ↓.

kleinern (↑). Man kann also folgende zusammenfassende Regel aufstellen: Jedesmal, wenn sich in der primären Leitung der elektrische Zustand (der Strom) ändert, entsteht in der sekundären Leitung ein Induktionsstrom.

Natürlich kann man auch dadurch in dem sekundären Leiter Ströme induzieren, dass man die Entfernung zwischen *ab* und *cd* vergrössert oder verkleinert.

Die Richtung der Induktionsströme kann zunächst bei den zuletzt erwähnten Versuchen leicht mit Hülfe des Lenzschen Gesetzes und der Ampèreschen Regel über die elektrodynamischen Kräfte paralleler Stromleiter (s. Seite 105) ermittelt werden. Wird *cd* sich selbst parallel der primären Leitung genähert, so muss, damit Abstossung erfolgt, der Induktionsstrom die entgegengesetzte Richtung besitzen wie der primäre Strom. Ruhen beide Leiter, so bedeutet Schliessen des primären Stromes soviel wie plötzliche Annäherung eines stromdurchflossenen Drahtes aus sehr grosser Entfernung an den sekundären Leiter; der induzierte Strom muss also von rechts nach links fliessen. Unterbrechung des primären Stromes wirkt gerade so, wie wenn ein konstanter Strom plötzlich in sehr weite Entfernung gerückt wird etc.

Die in der sekundären Leitung induzierte elektromotorische Kraft ist um so grösser, je grösser die auf die Sekunde umgerechnete Änderung der primären Stromstärke[1]) ist oder, anders ausgedrückt, je rascher man die Feldstärke ändert. Die denkbar schnellsten Änderungen der Feldstärke erzielt man, wenn man den Stromkreis öffnet und schliesst. Ferner ist unter sonst gleichen Umständen die induzierte elektromotorische Kraft proportional der Länge der beiden Leiter. Dagegen wird die Induktionswirkung um so kleiner, je grösser bei nichtparalleler Lage der beiden Drähte der Winkel ist, den der primäre Leiter mit einer dem sekundären Drahte parallel gezogenen und den ersteren schneidenden Geraden bildet, je grösser ferner der Abstand der beiden Drähte ist.

Um stärkere Induktionswirkungen zu erzielen, bedient man sich einer Drahtspule, in deren Hohlraum man eine zweite

1) Variiert man beispielsweise den primären Strom in $^1/_5$ Sekunde von 10 Amp. bis zu 4 Amp., so ist die sekundliche Änderung der Stromstärke 30 Amp.

Spule schieben kann (s. Fig. 69). Da sich ein stromdurchflossenes Solenoid wie ein Magnet verhält, so kann man die Betrachtungen über die Magnetinduktion leicht auf den vorliegenden Fall übertragen. Wird z. B. der aus einer der beiden Spulen und einem Elemente gebildete primäre Stromkreis geschlossen, so gehen die Kraftlinien des primären Feldes durch alle Windungsebenen der sekundären Spule hindurch; es ist also gerade so, als ob man einen Magnetstab in die sekundäre Spule hineingeschoben hätte.

Man kann die Induktionswirkungen dadurch bedeutend verstärken, dass man in die induzierende Spule einen weichen Eisenkern oder besser noch ein Bündel Eisenstäbchen legt. Da das Eisen durch den primären (induzierenden) Strom magnetisiert (bezw. entmagnetisiert) wird, so kommt zur Voltainduktion noch die Magnetinduktion hinzu.

Für Versuche kann man einen gewöhnlichen Induktionsapparat, dessen Hammer man ausser Betrieb setzt, oder einen sogen. Schlittenapparat (s. Fig. 69) benutzen. P ist die primäre

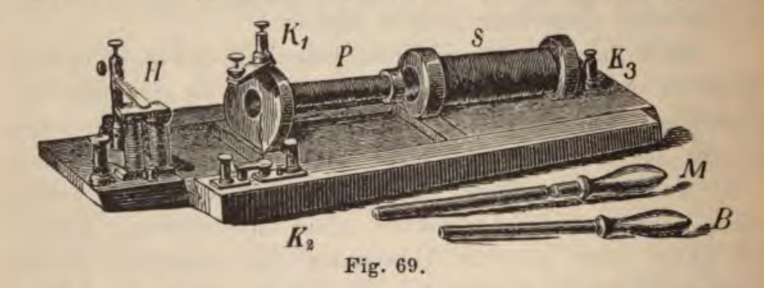


Fig. 69.

Spule, deren Enden mit den Klemmen K_1 und K_2 in Verbindung stehen[1]). Man verbinde K_1 mit einer Stromquelle (1—2 Akkumulatoren), diese mit einem Kurbelrheostat und letzteren endlich mit K_2 (primärer Stromkreis). Die Klemmen der aus sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes bestehenden sekundären Spule (in der Figur ist nur die Klemme K_3 sichtbar) werden mit einem Galvanoskop verbunden. 1) Schiebt man nach Schliessung des primären Stromes S schnell nach links, so schlägt der Zeiger des Galvanoskops aus. 2) Es erfolgt ein Ausschlag nach der entgegen-

1) Den Hammer H setzt man bei den ersten Fundamentalversuchen nicht in Tätigkeit.

gesetzten Seite, wenn man S zurückschiebt. 3) Bei geöffnetem Stromkreise schiebe man S über P und schliesse dann den primären Strom. 4) Man unterbreche den primären Strom. 5) Man wiederhole die Versuche, nachdem man den Eisenstab B in die Spule P gesteckt hat [1]). 6) Man verstärke und schwäche den Batteriestrom.

Geschichtliches. Schon 1824 machte Arago Beobachtungen über die unter dem Namen Rotationsmagnetismus zusammengefassten Erscheinungen. Diese benutzte Seebeck (1826) zur Metalldämpfung schwingender Magnete. Eine Erklärung der Erscheinungen gab erst Faraday (1831), als er sie zum Gegenstand seiner berühmten „Experimentaluntersuchungen" machte. In diesen wurden die physikalischen Grundlagen der „Induktion", d. h. der Spannungserregung in jedem von Kraftlinien geschnittenen Leiter experimentell festgestellt. Das Jahr 1831 kann also als das Geburtsjahr der Starkstromtechnik bezeichnet werden. Durch quantitative Untersuchungen über die Induktion, die übrigens unabhängig von Faraday ebenfalls im Jahre 1831 der Amerikaner Henry entdeckt, in ihrer Bedeutung aber nicht erkannt hat, tat sich unter anderen Forschern Lenz hervor. Diese führten ihn zur Aufstellung seines bekannten Gesetzes (1834). — Die Namen Magnet- und Voltainduktion wurden von Faraday eingeführt.

Die in Metallmassen durch Bewegung im magnetischen Felde erzeugten Wirbelströme werden auch Foucaultsche Ströme genannt, weil Foucault zuerst die Beobachtung gemacht hatte, dass die Induktionsströme in den Metallmassen Wärme erzeugen.

3. **Selbstinduktion** (Induktion eines Stromes auf sich selbst). Ein elektrischer Strom ruft bei Änderungen der Stromstärke nicht nur in benachbarten (fremden) Leitern elektromotorische Kräfte ins Leben, sondern auch in seiner eigenen Bahn. Betrachten wir zunächst einen geraden Leiter (Draht). Einen solchen können wir uns aus vielen, sehr dünnen Fäden zusammengesetzt denken, die wir mit f_1, f_2 . . . bezeichnen wollen. Wird der Stromkreis geschlossen, so fliesst durch jeden Faden ein Strom, und es wirkt der Faden f_1 auf alle übrigen induzierend ein, ebenso f_2 etc. Es wird also in dem Leiter eine elektromotorische Kraft induziert. Ent-

1) M ist ein Magnetstab, den man (nebst der Spule S) bei Versuchen über die Magnetinduktion benutzt.

sprechendes gilt bei der Unterbrechung, der Schwächung sowie bei der Verstärkung des Stromes. Die Induktion, die durch einen Strom in dem von ihm durchflossenen Leiter hervorgerufen wird, bezeichnet man als Selbstinduktion. Sie spielt bei Wechselströmen eine sehr wichtige Rolle.

Bei geradlinigen Leitern ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion, wenn es sich nicht um sehr lange Leitungen handelt (Telegraphie, Kraftübertragungen auf grosse Entfernungen), so klein, dass man sie praktisch vernachlässigen kann. Dagegen kann sie in Spulen ganz beträchtliche Werte annehmen. Dies kann man sich etwa folgendermaßen klar machen. Wird der Stromkreis geschlossen, so tritt der Strom zuerst in die erste Windung der Spule ein, etwas später in die zweite u. s. w. In dem Momente, in dem sich der Strom in die Windung 1 stürzt, wird in den Windungen 2, 3 etc. eine elektromotorische Kraft induziert, die einen Strom ins Leben zu rufen sucht, der dem Batteriestrome entgegengesetzt gerichtet ist.

Jede Windung kann man als eine Drahtschleife ansehen. Eine solche betrachten wir für sich allein. Wird der Strom geschlossen, so wird ein Feld erzeugt, dessen Kraftlinien durch die Fläche der Schleife gehen; es ändert sich also schnell die Zahl der die Ebene durchsetzenden Kraftlinien. In der Schleife muss also eine elektromotorische Kraft induziert werden; diese muss der schon vorhandenen elektromotorischen Kraft des anwachsenden Stromes entgegenwirken (nach dem Energiesatze).

In unserer Spule entsteht also *in dem Augenblicke, in dem der Stromkreis geschlossen wird*, gleichsam *eine Gegenströmung, durch die verhindert wird, dass der Strom sofort seine dem Ohmschen Gesetze entsprechende Stärke J annimmt*; es vergeht also nach Stromschluss eine gewisse, allerdings sehr kurze Zeit, bis der Strom seinen Endwert J erreicht. Während dieser Zeit wird das Feld der Spule erzeugt und in diesem Energie aufgespeichert.

Wird der Batteriestrom unterbrochen, so wird in der Spule eine neue elektromotorische Kraft induziert, die in demselben Sinne wirkt wie die Batteriespannung. Die Selbstinduktion sucht also jetzt zu verhindern, dass die Spule

stromlos wird, dass das Feld verschwindet[1]). Da die Selbstinduktion ein spezieller Fall der Voltainduktion ist, so folgt, dass sich in einem Stromkreise die Selbstinduktion auch dann bemerkbar macht, wenn sich die Stromstärke ändert, dass sie ferner bedeutend grösser wird, wenn in eine Spule ein Eisenkern geschoben wird.

Man nennt die Ströme[2]), die beim Öffnen und Schliessen eines Stromkreises in der Leitung erzeugt werden, **Extraströme.**

Bei schneller Unterbrechung eines Stromkreises geht die Abnahme der Stromstärke von J bis Null in kürzerer Zeit vor sich als bei der Schliessung die Zunahme von Null bis J. Da nun die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion der Geschwindigkeit, mit der sich die Stromstärke (bezw. das Feld) ändert (s. Selbstinduktionskoeffizient), proportional ist, so entsteht bei der Öffnung des Stromes eine viel höhere Spannung als bei der Schliessung.

Wird eine geradlinige Leitung, die man als induktionsfrei ansehen kann, durchgeschnitten, und nennen wir die so erhaltenen Endpunkte a und b, so herrscht zwischen a und b eine Potentialdifferenz, die gleich der elektromotorischen Kraft der Stromquelle ist. Die Spannung gleicht sich, so lange der Abstand zwischen a und b sehr klein ist, in Gestalt eines Fünkchens aus; wie lang dieses Fünkchen werden kann, hängt von der Spannung der Stromquelle ab und von verschiedenen anderen Faktoren, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Ist der Stromkreis aber mit Selbstinduktion behaftet, ist beispielsweise ein Elektromagnet eingeschaltet, so kommt bei der Stromunterbrechung zu der Batteriespannung noch eine elektromotorische Kraft (additiv) hinzu, es ist also gerade so, als ob ein Stromkreis unterbrochen würde, der an eine Stromquelle von viel höherer Spannung angeschlossen ist. Es entsteht daher ein kräftigerer Funken als in dem zuerst besprochenen Falle.

Geht die Unterbrechung eines Stromkreises langsam vor sich, dreht man beispielsweise den Hebel eines Ausschalters langsam,

---

1) Man vergleicht die Selbstinduktion mit der Trägheit der Materie, die einer Änderung des augenblicklichen Bewegungszustandes einen Widerstand entgegensetzt.

2) Streng genommen entsteht bei der Schliessung kein Strom, sondern es wird eine Spannung erzeugt, die der elektromotorischen Kraft der Stromquelle entgegenwirkt.

so kann die Funkenentladung in einen Lichtbogen übergehen, durch den die Kontakte zerstört werden können.

Versuche über die Selbstinduktion, die man ohne besonders für diesen Zweck konstruierte Apparate ausführen kann, sind folgende.

1) *A* in Fig. 70 sei ein Gefäss, in dem sich Quecksilber befindet, *S* ein Stromschlüssel, *M* eine Spule eines Elektromagnets, *B* eine Stromquelle von 1—2 Akkumulatoren. Taucht man bei der gezeichneten Stellung des Hebels *S* das blanke Ende des frei endenden Drahtes in das Quecksilber, und hebt man den Draht schnell in die Höhe, so beobachtet man einen hellen, starken Funken; schaltet man aber *M* mittels des Ausschalters kurz, so entsteht bei Wiederholung des Versuches trotz des kleineren Widerstandes nur ein schwacher Funken. (Der Strom darf nur ganz kurze Zeit geschlossen bleiben, weil sonst die Akkumulatoren Schaden leiden.)

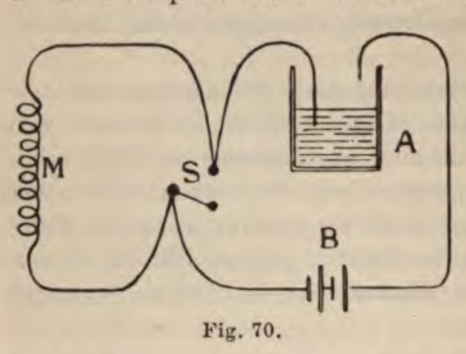


Fig. 70.

2) Man stelle sich in der früher beschriebenen Weise eine Wheatstonsche Brücke her und benutze als Widerstand w_1 (siehe Fig. 34, Seite 72) einen möglichst induktionsfreien Leiter (Kurbelrheostat, Glühlampe), dagegen als Widerstand w_2 einen Elektromagnet mit vielen Windungen (z. B. den Elektromagnet eines Morse-Apparates). Hat man bei geschlossenem Stromkreise die Diagonale stromlos gemacht, so beobachtet man beim Öffnen und Schliessen des Stromes, dass die Galvanometernadel ausschlägt.

Ein anderer Versuch über die Selbstinduktion wird in dem Kapitel „Wechselströme" zur Sprache kommen.

Selbstinduktionskoeffizient. Die in einer Spule bei Stromschwankungen induzierte elektromotorische Kraft hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die Änderung der Stromstärke erfolgt. Nennt man die auf 1 Sekunde umgerechnete Änderung der Stromstärke a, so ist die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion proportional a, kann also gleich L.a gesetzt werden, wo L ein Faktor ist, dessen Wert von den Dimensionen der Spule, der Windungs-

zahl, den Wickelungsverhältnissen und, falls die Spule einen Eisenkern enthält, von der Beschaffenheit und der Masse des Eisens abhängig ist. Man nennt L den Selbstinduktionskoeffizienten (oder die Induktanz). Beträgt die sekundliche Änderung der Stromstärke 1 Amp., ist also a = 1, so ist die in der Spule induzierte elektromotorische Kraft gleich L Volt. Ist die Spule so beschaffen, dass bei a = 1 (Amp.) die in ihr induzierte elektromotorische Kraft 1 Volt ist, so sagt man, der Selbstinduktionskoeffizient betrage 1 Henry. Der tausendste Teil eines Henry wird Millihenry genannt.

Beispiele: Der durch eine Spule, deren Koeffizient der Selbstinduktion 0,5 Henry betrage, fliessende Strom ändere sich in $^1/_{10}$ Sekunde um 20 Amp. Die sekundliche Änderung der Stromstärke a = 20 . 10 = 200 Amp. und die induzierte Spannung ist gleich 0,5 . 200 = 100 Volt. Der Selbstinduktionskoeffizient für 100 km Telegraphenleitung aus Kupfer- oder Bronzedraht beträgt (nach Strecker, Hülfsbuch für die Elektrotechnik) 0,3 Henry, für den Elektromagnet eines Morse-Apparates bei aufliegendem Anker 18 Henry, bei abstehendem Anker 13 Henry.

Die Arbeit, die der Strom verrichten muss, um entgegen der Selbstinduktion von Null auf seinen dem Ohmschen Gesetze entsprechenden Wert J zu steigen, ist gegeben durch den Ausdruck $\frac{1}{2}$ L J². Diese Arbeit wird während des Anwachsens der Stromstärke in dem Felde der Spule aufgespeichert (dient zur Erzeugung des Feldes) und erscheint bei der Öffnung des Stromes wieder als Öffnungsextrastrom.

Der Widerstand eines Stromkreises sei w Ohm, der Selbstinduktionskoeffizient L Henry, die elektromotorische Kraft betrage e Volt. $\frac{e}{w}$ = J ist also die dem Ohmschen Gesetze entsprechende Stromstärke. Maßgebend für das Ansteigen (bei Stromschluss) und das Abfallen (bei Stromunterbrechung) der Stromstärke ist der Quotient $\frac{L}{w}$. Je grösser $\frac{L}{w}$, um so langsamer erfolgt das Ansteigen des Stromes. Da der Wert $\frac{L}{w}$ ein Kennzeichen für die Schnelligkeit des Anwachsens ist, so nennt man diesen Quotienten die Zeitkonstante des Stromkreises. Sind nach Schliessung des

Stromes $\frac{L}{w}$ Sekunden verflossen, so hat der Strom den Wert 0,63 J, nach etwas mehr als der doppelten Zeit schon den Wert 0,9 J.

Wenn man einen grossen Elektromagneten mit einer Stromquelle von 1—2 Akkumulatoren verbindet[1]), so kann man bei einem eingeschalteten aperiodischen Amperemeter das allmähliche Anwachsen des Stromes beobachten.

Wenn man einen Draht in der in Fig. 71 angedeuteten Weise umbiegt, so fliesst ein Strom in der einen Hälfte immer in der entgegengesetzten Richtung wie in der anderen Hälfte. Eine solche bifilare Leitung übt nach aussen und auf sich selbst nur sehr geringe Induktionswirkungen aus, sie ist induktionsfrei. Um eine bifilar gewickelte Spule zu erhalten, biegt man einen langen Draht in der Mitte um und wickelt ihn auf einen Holzcylinder in der Weise auf, dass die beiden Hälften bei den einzelnen Windungen dicht nebeneinander liegen.

Fig. 71.

Jenkin und Masson beobachteten 1834, dass man einen „Schlag" erhält, wenn man einen Stromkreis mit vielen Windungen unterbricht. Faraday übernahm die Untersuchung über „die Induktion eines elektrischen Stromes auf sich selbst" und erklärte sie mit Hülfe seiner Kraftlinientheorie (1834—1835).

4. **Induktionsapparate.** Apparate, mittels deren man durch schnelles Öffnen und Schliessen eines (primären) Stromes in einer Spule hohe Induktionsspannungen erzeugt, nennt man Induktionsapparate oder Induktorien (oder Rühmkorffsche Apparate). Sie finden im Laboratorium, für medizinische Zwecke, bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen und in der Funkentelegraphie Verwendung.

Ein Induktorium besteht aus einer primären Spule aus einer geringeren Anzahl von Windungen eines dicken

---

1) Damit $\frac{L}{w}$ einen grossen Wert hat, muss der Widerstand im Stromkreise klein sein. Man darf also keinen Kurbelrheostat benutzen. Selbstverständlich ist ein Hitzdrahtinstrument nicht geeignet.

Drahtes, dem Eisenkern, der sekundären Spule mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes, dem Stromunterbrecher und dem Kondensator; dieser braucht aber nicht immer vorhanden zu sein. Die Wirkungsweise eines Induktionsapparates mit Platinunterbrecher, auch Wagner-Neefscher Hammer genannt, ergibt sich aus der schematischen Figur 72 (s. auch Fig. 75). Die Enden der primären (inneren) Spule stehen in Verbindung mit den Klemmschrauben K_1, K_2, diejenigen der sekundären Wickelung mit P_1, P_2. Der

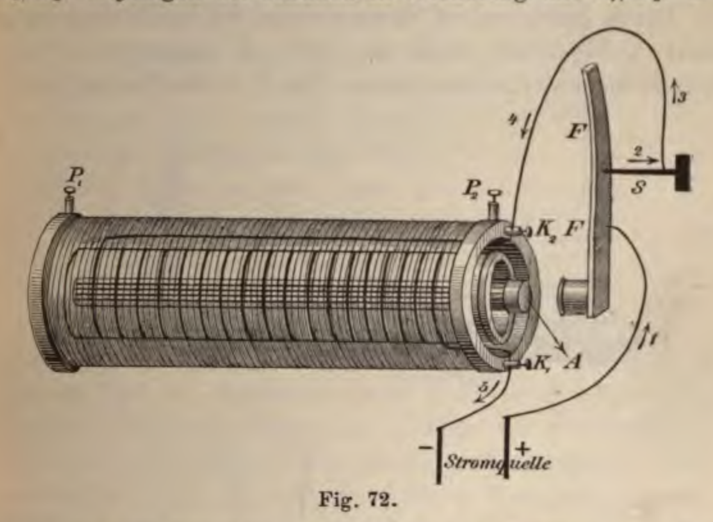


Fig. 72.

Hohlraum der primären Spule nimmt ein Bündel aus weichen, gegeneinander isolierten (z. B. durch einen Firnisüberzug) Eisenstäbchen (s. S. 133) auf, das auf der rechten Seite etwas aus der Spule herausragt und mit einer Kappe A versehen ist. Der Stromunterbrecher besteht aus einem kleinen Eisenkern, der an einem federnden Stahlbande F[1]) befestigt ist, und aus

1) Die Feder F muss natürlich an einem Ende (in der Figur oben) fest eingeklemmt sein. Sie bildet mit dem auf ihr befestigten Eisencylinderchen den Hammer. Das Ende des Stiftes s besteht aus Platin, weil andere Metalle durch die Funken schnell zerstört (zerstäubt) werden. Aus demselben Grunde nietet man auf F dem Stifte gegenüber ein kleines Platinblech fest. Daher der Name Platinunterbrecher.

einem Stifte *S*. Man richtet es so ein, dass die Spitze von *S* die Feder *F* berührt, wenn der Apparat nicht in Betrieb ist. Verbindet man nun die Pole einer Stromquelle (von geringem inneren Widerstand) mit *F* und K_1, so nimmt der primäre Strom den durch die Pfeile 1 bis 5 angedeuteten Weg, fliesst also nach *F*, *S*, K_2, durch die primäre Spule und dann zur Stromquelle zurück. In der sekundären Spule aber wird eine elektromotorische Kraft induziert, die wegen der sehr grossen Windungszahl ganz bedeutend ist.

Durch den primären Strom werden die Eisenstäbe magnetisiert; infolgedessen wird der Anker *H* angezogen und der Hauptstrom unterbrochen (siehe Fig. 73). Die Eisenstäbe ver-

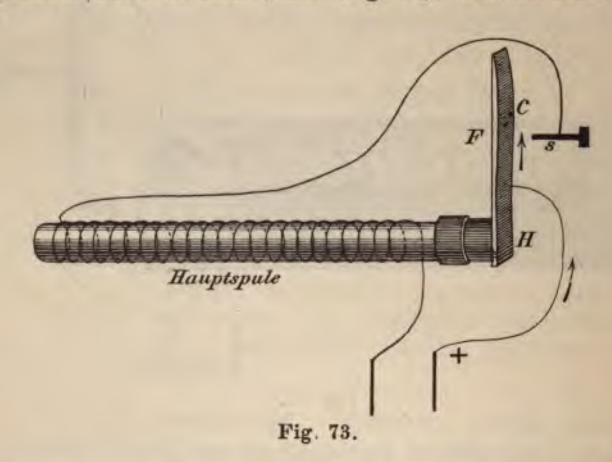


Fig. 73.

lieren jetzt ihren Magnetismus (grösstenteils), der Anker *H* wird von der Feder zurückgezogen, und der Hammer schlägt gegen den Stift *S*, so dass der primäre Strom wieder geschlossen ist. Jetzt wiederholt sich das Spiel.

Die Selbstinduktion wirkt sowohl bei der Öffnung wie bei der Schliessung störend[1]), indem sie bei der Schliessung das schnelle Anwachsen des primären Stromes verhindert und

1) Wenn es sich um den Betrieb von Röntgenröhren handelt, so ist die Selbstinduktion bei der Schliessung eine willkommene Erscheinung; denn dann ist es günstig, wenn die induzierten Ströme hauptsächlich in einer Richtung fliessen.

bei der Öffnung den schnellen Abfall. Die induzierten Spannungen sind aber, wie wir wissen, um so grösser, je schneller sich die Stärke des primären Stromes ändert. Nun gibt es ein Mittel, den schädlichen Einfluss der Selbstinduktion bei der Stromunterbrechung stark zu verringern. Es besteht darin, dass man parallel zur Funkenstrecke einen Kondensator legt (siehe die schematische Fig. 74). Damit wir den Nutzen dieser Anordnung erkennen, müssen wir uns die Vorgänge bei der Unterbrechung des primären Stromes vor Augen führen. Der Hammer *H* möge sich zunächst nur um ein sehr kleines Stück von dem Stifte *S* entfernt haben, es sei also zwischen *S* und *F* eine sehr dünne Luftschicht eingeschaltet. Der primäre Strom ist dann zwar geschwächt, aber keineswegs unterbrochen; durch den Funken nämlich, der sich bildet, fliesst Elektrizität von *S* nach *F*. Bewegt sich *F* abermals um ein kleines Stückchen nach links, so nimmt der Strom wieder etwas ab, und die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion unterstützt die Batteriespannung. Infolge der Funkenbildung ist also die Unterbrechung des Stromes eine verzögerte. Wenn man nun der durch die Selbstinduktion in Bewegung gesetzten Elektrizität einen anderen, bequemeren Weg bietet, so wird die Funkenbildung verringert und damit der Unterbrechungsvorgang beschleunigt. Dieser Weg muss natürlich so beschaffen sein, dass er für den Batteriestrom unpassierbar ist, weil ja sonst eine Stromunterbrechung überhaupt nicht zu stande käme; dieser Anforderung genügt eben der Kondensator *C*. Dieser nimmt die infolge der Selbstinduktion an den Unterbrechungsstellen sich anhäufenden Elektrizitäten auf. Ist der Stromkreis unterbrochen, so entlädt sich der Kondensator[1]). Dieser wird in einem Holzkasten untergebracht (Fig. 75).

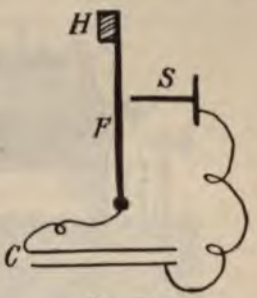


Fig. 74.

1) Die günstige Wirkung des Kondensators erkennt man, wenn man einen Funkeninduktor zuerst mit, dann ohne Kondensator in Betrieb setzt.

Wenn man die beiden sekundären Klemmen (P_1 und P_2 in Fig. 72) durch einen Draht miteinander verbindet, so erhält man in der sekundären Spule Ströme, deren Richtung sich fortwährend ändert (Wechselströme). Obschon die bei der Öffnung induzierte elektromotorische Kraft grösser ist als diejenige bei der Schliessung, so entsprechen den beiden Vorgängen dennoch, wie hier nicht nachgewiesen werden kann, gleiche Mengen sich bewegender Elektrizität (natürlich in der sekundären Spule).

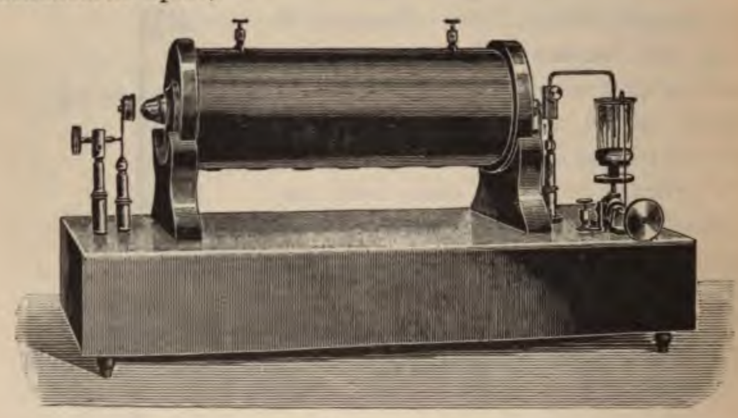


Fig. 75.

Ist eine Funkenstrecke eingeschaltet, so ist unter Umständen die Spannung des Öffnungsstromes imstande die Luftstrecke in Gestalt eines Funkens zu durchbrechen, nicht aber die beim Schliessen induzierte Spannung. Man erhält also nur Funken, die der Öffnung des primären Stromes entsprechen, d. h. man erhält Stromimpulse einer Richtung.

Für einen diesbezüglichen Versuch kann man die in Fig. 76 abgebildete Geisslersche Röhre (nach Holtz) benutzen. Ein an



Fig. 76.

der rechten Elektrode eintretender Strom kann leichter durch den unteren Teil der Röhre hindurch als durch die obere Hälfte.

Verbindet man die beiden Elektroden mit den sekundären Klemmen eines Induktionsapparates mit Platinunterbrecher, so leuchtet nur die eine Hälfte der Röhre.

Über den Bau der Induktorien [1]) sollen noch einige Bemerkungen hier Platz finden. Die Windungszahl der primären Spule muss so bemessen sein, dass bei dem maximalen Strome der Eisenkern bis zur Sättigung magnetisiert wird. Hierbei ist auch auf die Dauer des Stromschlusses Rücksicht zu nehmen (s. Zeitkonstante, Seite 127).

Der Eisenkern muss möglichst unterteilt (und weich) sein, er muss also aus Stäbchen oder dünnen Blechen, die gegeneinander isoliert sind (Firnis, Papier), zusammengesetzt sein. Gründe: 1) schnellere Magnetisierung, 2) Unterdrückung der Wirbelströme. Diese wirken auf die sekundäre Spule induzierend und zwar im entgegengesetzten Sinne wie der primäre Strom, ferner wird durch sie der Magnetismus geschwächt und das Eisen erwärmt; endlich wird für ihre Erzeugung nutzlos Energie verbraucht.

Um grosse Schlagweite zu erhalten, macht man die Windungszahl der sekundären Spule möglichst gross. Ein Induktionsapparat von 40—45 cm Funkenlänge enthält ca. 200000 Windungen (ca. 100 km) eines 0,2 mm dicken, mit Seide übersponnenen Kupferdrahtes (l. c. Seite 30). Der Draht muss so gewickelt werden, dass zwischen benachbarten Windungen keine grossen Potentialdifferenzen auftreten, weil sonst ein Überspringen von Fünkchen (Durchschlagen der Isolation) im Innern der Spule erfolgen kann. Man wickelt bei grossen Funkeninduktoren den Draht in der Weise, dass man dünne Schichten senkrecht zur Achse (scheibenförmige Spulen) herstellt und diese durch gut isolierende Platten voneinander trennt. Die einzelnen Scheiben werden hintereinander geschaltet. Der Widerstand der sekundären Spule zählt nach Tausenden von Ohm.

Die Unterbrecher [2]). Der Wagner-Neefsche Hammer wird nur für Funkeninduktoren bis zu etwa 20 cm Schlagweite benutzt. Man erzielt nur eine geringe Anzahl von Unterbrechungen (15 bis 20 per Sekunde). Eine Modifikation ist der Deprez-Unterbrecher [3]), bei dem ein um seine Mitte schwingender Eisenanker bei jeder Schwingung gegen einen verstellbaren Platinstift schlägt. Auf der einen Seite des Ankers zieht eine Feder,

1) Näheres siehe E. Ruhmer, Konstruktion, Bau und Betrieb der Funkeninduktoren.

2) Siehe auch Seite 111.

3) Von einer ausführlichen Beschreibung der verschiedenen Unterbrecher muss wegen Raummangels Abstand genommen werden.

auf der anderen ein durch den Hauptstrom erregter Elektromagnet. Die Unterbrechungszahl ist grösser als bei dem Wagnerschen Hammer.

Das Prinzip des Vril-Unterbrechers besteht darin, die Kontaktdauer, d. h. die zwischen Stromschluss und Stromunterbrechung liegende Zeit, die bei den vorigen Unterbrechern für eine vollständige Magnetisierung des Eisenkerns kaum ausreicht, zu verlängern. Die Einrichtung ist so getroffen, dass man die Dauer des Stromschlusses durch Drehung einer Schraube regulieren kann.

Bei den Quecksilberunterbrechern geht die Unterbrechung zwischen Quecksilber und einem festen Leiter vor sich. Um stärkere Funkenbildung und die Entstehung eines Lichtbogens zu verhindern, giesst man auf das Quecksilber eine die Elektrizität sehr schlecht leitende Flüssigkeit (Alkohol, Petroleum). Die Einrichtung des einfachen Quecksilberunterbrechers ersieht man aus der schematischen Figur 77 (s. auch Fig. 75). *K* ist das aus der primären Spule herausragende Ende des Eisenkerns, *A* der an dem federnden, unten eingeklemmten Metallstreifen *F* befestigte Anker; dieser ist an einem zweimal rechtwinklig gebogenen, dicken Metalldraht befestigt, dessen freies Ende in Quecksilber eintaucht. Die Stromschlussdauer kann dadurch reguliert werden, dass man mehr oder weniger Quecksilber in das Glas *G* giesst.

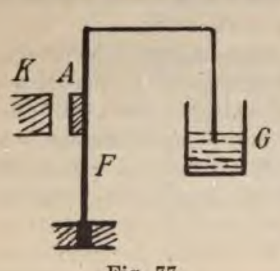


Fig. 77.

Bei den Quecksilberwippen sind zwei mit Quecksilber gefüllte Gefässe vorhanden und ebenso zwei Kontaktdrähte. Diese sind an einem Träger befestigt, der durch einen Elektromagnet in Schwingungen versetzt wird.

Der Motor-Quecksilberunterbrecher besteht aus einem Elektromotor, der aus einer besonderen Stromquelle gespeist oder mit dem Funkeninduktor parallel geschaltet wird, und der Kontaktvorrichtung, einem Stifte, der durch den Elektromotor abwechselnd gehoben und gesenkt wird (25—30 Unterbrechungen in der Sekunde). Die Firma F. Ernecke in Berlin verwendet einen Doppelkontakt, so dass der Strom bei jeder Umdrehung des Motors zweimal geschlossen und geöffnet wird.

Die vollkommensten aller mechanischen[1]) Unterbrecher dürften

1) Man kann zwischen mechanischen und elektrolytischen Unterbrechern unterscheiden, zu den letzteren gehören der Wehnelt- und der Loch-Unterbrecher.

wohl die Quecksilberstrahl-Unterbrecher sein, indem man bei ihnen Unterbrechungszahlen bis zu mehreren Hundert in der Sekunde erzielen kann, was besonders, wenn es sich um die Erzeugung von Röntgenstrahlen handelt, von grossem Nutzen ist. Man kann die Quecksilberstrahl-Unterbrecher in zwei Gruppen einteilen, nämlich in solche, bei denen der Quecksilberstrahl rotiert und der Kontaktring ruht, und in solche, bei denen der Strahl ruht und der Ring rotiert. Die ersteren sind besonders von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) ausgebildet worden und werden kurz als Turbinen-Unterbrecher bezeichnet. Ein rechtwinklig gebogenes Metallrohr im Innern eines Glases taucht mit seinem vertikal stehenden Teile z. T. in Quecksilber, das mit einer schlecht leitenden Flüssigkeit (Alkohol, Petroleum) so hoch bedeckt ist, dass auch der horizontale Teil des Rohres sich innerhalb der Flüssigkeit befindet. Wird das Rohr um seinen vertikalen Schenkel in schnelle Rotation versetzt — was durch einen Elektromotor bewirkt wird (s. Fig. 78) —, so

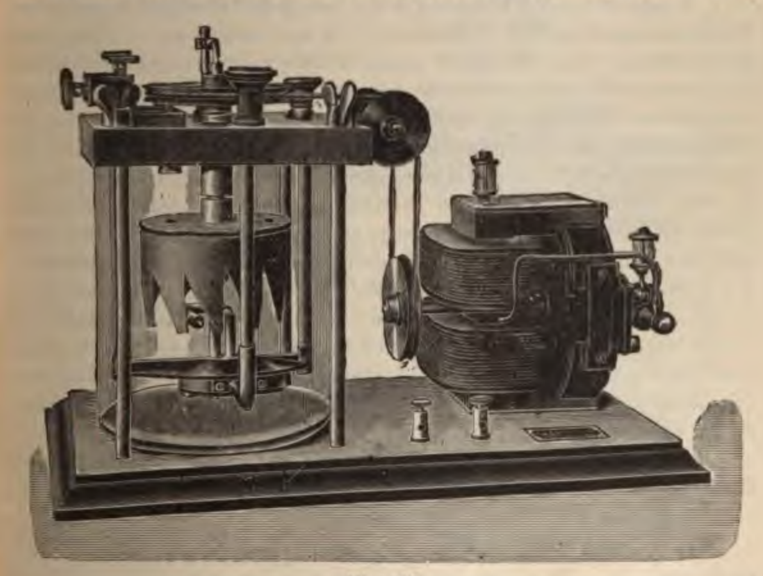


Fig. 78.

wird die in dem horizontalen Schenkel befindliche Flüssigkeit durch die Centrifugalkraft aus dem Rohr getrieben; infolgedessen wird das Quecksilber angesaugt. Ist die Umdrehungszahl gross genug, so wird der Alkohol ganz aus dem Rohr verdrängt und durch Quecksilber ersetzt, das als kräftiger Strahl herausgeschleudert

wird. Umgibt man die Turbine mit einem (feststehenden) Metallringe, der mit Aussparungen versehen ist, so trifft der Strahl abwechselnd den Ring oder geht durch eine Aussparung hindurch. Wird der Ring und das Metallrohr bezw. das Quecksilber in den Primärstromkreis eines Induktors eingeschaltet, so wird der Strom jedesmal dann geschlossen, wenn der Quecksilberstrahl den Ring trifft.

Man kann die Unterbrechungszahl in weiten Grenzen regulieren (Regulierung der Tourenzahl des Elektromotors, Verwendung verschiedener Kontaktringe). Hieraus ergibt sich als weiterer Vorteil, dass der Turbinen-Unterbrecher gestattet, mit kleineren Induktionsapparaten bei Benutzung höherer Spannung (110 Volt) die gleichen Resultate zu erzielen, die sonst nur mit grossen Apparaten erreicht werden.

Bei den Quecksilberstrahl-Unterbrechern mit rotierendem Ringe wird der Quecksilberstrahl durch eine in ein Gehäuse eingeschlossene Kapselräderpumpe erzeugt.

Ausgedehnte Verwendung findet bei dem Betriebe von grösseren Funkeninduktoren der Wehnelt-Unterbrecher. Wenn man in verdünnter Schwefelsäure einer Platte mit grosser Oberfläche eine Elektrode mit einer sehr kleinen (von der Säure benetzten) Oberfläche (als Anode) gegenüberstellt und die Elektroden mit einer Stromquelle von grösserer elektromotorischer Kraft (60—110 Volt) verbindet, so dass ein starker Strom entsteht (8—15 Amp.), so ist die Stromdichte an der kleinen Elektrode eine sehr hohe. Infolgedessen findet dort eine sehr starke Wärmeentwickelung statt, und die Flüssigkeit in der Umgebung wird in Dampf verwandelt. Da die die Elektrode umgebende Dampfhülle den Strom nicht leitet, so sinkt die Stromstärke plötzlich auf Null. Bei der Stromunterbrechung kühlt sich der Dampf schnell ab und kondensiert sich, so dass wieder ein starker Strom zu stande kommt. (Es kommt hinzu, dass die Dampfhülle durch den Öffnungsfunken z. T. fortgeschleudert wird.)

Die Unterbrechungen gehen schneller vor sich, wenn sich im Stromkreise eine Spule mit hoher Selbstinduktion [1]) (Drosselspule,

---

1) Einfache Versuche sind folgende: Durch einen grossen Kork stecke man einen dicken Kupferdraht, so dass er auf der einen Seite nur 1—2 mm herausragt. Taucht man den Kork etwa bis zur Mitte in verdünnte Schwefelsäure ein, so hat man eine Elektrode mit kleiner Oberfläche, die man leicht grösser oder kleiner machen kann. Als zweite Elektrode kann man eine Blei- oder Kohlenplatte benutzen, wie sie bei den Bunsen-Elementen Verwendung findet. Den Apparat schliesst man unter Zwischenschaltung eines Kurbelrheostats an eine Stromquelle von 60 bis

Elektromagnet) befindet. Wenn nämlich der Strom plötzlich unterbrochen wird, so entsteht infolge der Selbstinduktion eine sehr hohe elektromotorische Kraft; diese ist im stande, die dünne Dampfhülle schnell zu durchbrechen. Dieser Durchgang der Elektrizität durch den Dampf ist mit Knallgasbildung verbunden. Dieses explodiert, und durch die Explosion wird der Rest der Gashülle fortgeschleudert, so dass der Elektrolyt aufs neue an die Elektrode herantritt. Die Unterbrechungszahl steigt, wenn genügende Selbstinduktion vorhanden ist, bis auf einige Hundert in der Sekunde.

Die Einrichtung, die man dem Wehnelt-Unterbrecher gewöhnlich gibt, ist aus der Fig. 79 zu ersehen. Ein Metallstift ist von einem Porzellanrohr umgeben und trägt unten einen Platinstift. Mittels eines Schraubengewindes und einer Hartgummimutter kann man die Länge des aus der Röhre herausragenden Teiles des Platinstiftes regulieren. Da beim Betriebe die Säure in dem Rohr emporsteigt, so erweitert sich dieses nach oben stark. Die eindringende Säure findet genügend Raum. Die Luft entweicht durch ein oberhalb des Deckels angebrachtes Loch.



Fig. 79.

Benutzt man Gleichstrom, so ist darauf zu achten, dass die Platinspitze mit dem positiven Pole der Leitung verbunden wird, da

---

110 Volt an. Schaltet man noch einen Elektromagneten oder die primäre Spule eines Induktionsapparates ein, so wird das Knattern stärker und man gewinnt sofort den Eindruck, dass die Unterbrechungszahl wesentlich grösser geworden ist.

sich sonst die Platinspitze schnell abnutzt. Durch Vorschieben des Platinstiftes aus seiner isolierenden Hülle wird die Stromstärke vergrössert, während die Unterbrechungszahl sinkt. Erhöht man die Spannung am Apparate durch Ausschalten von Widerstand am Stromregulator, ohne die Oberfläche des Platinstiftes zu ändern, so erhöht sich die Unterbrechungszahl.

Da die Unterbrechungen im Wehnelt-Unterbrecher sehr schnell und exakt erfolgen, so ist die **Einschaltung eines Kondensators** bei dem Induktionsapparate **überflüssig**.

Man ging nach der Erfindung des elektrolytischen Unterbrechers bald dazu über, Induktionsapparate zu bauen, die für den Betrieb mit Wehnelt-Unterbrecher besonders eingerichtet sind. Diese Apparate, die man mit Gleichstrom sowohl wie mit Wechselstrom speisen kann, geben ausserordentlich kräftige (dicke) Funken (siehe Fig. 80). Der sekundäre Strom hat also nicht nur eine sehr hohe Spannung, sondern auch eine (relativ) grosse Intensität, so

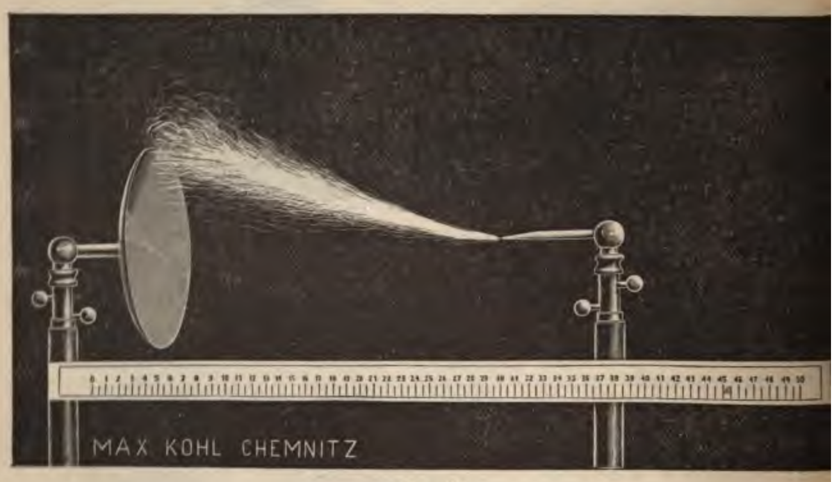


Fig. 80.

dass die Energie der Induktionsströme eine im Vergleich zu derjenigen der früheren Apparate wesentlich grössere ist[1]).

Die Wehnelt-Unterbrecher für Wechselstrombetrieb unterscheiden sich von denjenigen für Gleichstrom nur dadurch, dass

1) Nicht die Funkenlänge allein, sondern neben ihr die Leistung des sekundären Stromes ist für die Praxis (z. B. bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen) der maßgebende Faktor.

man einen stärkeren Platinstift benutzt, weil die Abnutzung eine grössere ist.

Als Elektrolyt benutzt man verdünnte Schwefelsäure vom spezifischen Gewichte 1,06. Während des Betriebes erwärmt sich die Flüssigkeit. Je höher die Temperatur steigt, um so unregelmässiger arbeitet der Unterbrecher, da mit wachsender Temperatur die Geschwindigkeit, mit der die Kondensation des Wasserdampfes erfolgt, abnimmt. Hat die Temperatur der Säure eine gewisse Höhe erreicht, so setzt der Unterbrecher aus. Man verwendet, um ein schnelles Ansteigen der Temperatur zu verhindern, grosse Gefässe oder man richtet es so ein, dass die Säure durch fliessendes Wasser gekühlt wird.

Bei dem Simon- oder Lochunterbrecher ist die eine Elektrode eine grosse Bleielektrode (K in Fig. 81), die zweite Elektrode besteht aus einer Glas- oder Porzellanröhre mit einer kleinen Öffnung; in der Röhre befindet sich ein Metallstift. Sämtliche Stromfäden müssen durch die Öffnung hindurch; infolgedessen wird der Elektrolyt, verdünnte Schwefelsäure, sehr stark erhitzt, und es erfolgt Verdampfung. Im übrigen sind die Vorgänge wie bei dem Wehnelt-Unterbrecher. Ein Vorzug des Lochunterbrechers besteht darin, dass kein Verbrauch von Platin stattfindet. Er ist auch noch bei Spannungen bis zu 250 Volt anwendbar, während der Wehnelt-Unterbrecher nur bis zu etwa 150 Volt benutzt werden kann. Nachteile sind die geringere Unterbrechungszahl und geringere Regulierbarkeit.

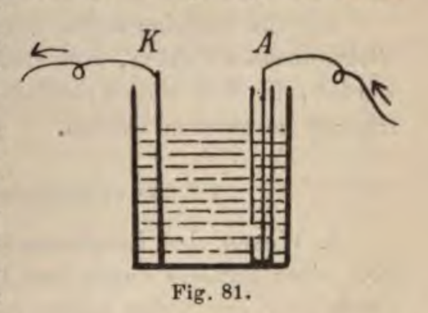


Fig. 81.

Funkenmesser (Funkenmikrometer). Eine runde Messingplatte (siehe Fig. 80) ist auf einem Träger so befestigt, dass ihre Oberfläche vertikal steht. Dem Mittelpunkte der Scheibe steht eine Messingspitze gegenüber, die an einem verschiebbaren Schlitten befestigt ist. Den Abstand zwischen der Spitze und der Platte kann man auf dem Boden des Apparates ablesen. Man muss die beiden Teile so mit den Klemmen der sekundären Spule verbinden, dass der Öffnungsfunke von der Spitze zur Platte überspringt. (Hat man falsch verbunden, so springen die Funken von dem Rande der Scheibe zur Spitze über.) Man vergrössert, wenn man die Schlagweite bestimmen will, die Entfernung zwischen

Spitze und Scheibe langsam so lange, bis man statt eines Funkenstromes einzelne, zeitlich scharf voneinander getrennte Funken erhält.

In dem Abschnitte über Röntgenstrahlen werden noch weitere Bemerkungen über die Funkeninduktoren Platz finden.

Zehntes Kapitel.

Wechselströme.

Auf die wichtige Rolle, welche die Wechselströme in der Elektrotechnik spielen, soll erst in dem Kapitel eingegangen werden, in dem die verschiedenen Systeme der Kraftübertragung besprochen werden.

I. Der einphasige Wechselstrom.

1. Wesen des Einphasenstromes. Verbindet man die Pole einer Batterie durch eine Leitung miteinander, so fliesst durch diese der Strom immer in derselben Richtung und hat, falls sich die elektromotorische Kraft oder der Widerstand im Stromkreise nicht ändert, konstante Intensität. Wenn aber die Leitung an eine Wechselstrommaschine [1]) angeschlossen wird, so unterliegen Richtung und Stärke des Stromes fortwährenden Änderungen, die nach einem bestimmten Gesetze erfolgen, und zwar in der Weise, dass eine bestimmte Stromrichtung und eine bestimmte Stromstärke nach Verlauf einer bestimmten Zeit immer wieder vorhanden sind — periodische Änderungen. Sind also *A* und *B* in Fig. 82 die Pole oder Klemmen

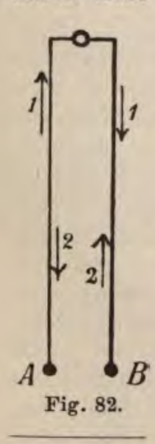


Fig. 82.

1) Eine solche erhält man in ihrer einfachsten Gestalt, wenn man eine Drahtspule einem Magnetpole abwechselnd nähert und von ihm entfernt.

einer Wechselstrommaschine, so fliesst der Strom während einer gewissen Zeit, die gleich τ sei, in der Richtung der Pfeile 1, dann gerade so lange in der Richtung der Pfeile 2 etc. Hat ferner in einem bestimmten Momente der Strom die Stärke i Amp., so hat er τ Sekunden später wieder die Stärke i Amp., ebenso nach $2\,\tau$ Sekunden etc. Stromrichtung und Stromstärke stimmen aber immer erst nach Verlauf von $2\,\tau$ Sekunden überein. Man nennt die Zeit $2\,\tau$ die Periode des Wechselstromes.

Die Vorgänge in einem Wechselstromkreise kann man mit den Schwingungen eines Pendels vergleichen. Der Geschwindigkeit des Pendels entspricht die Stromstärke; beide Grössen ändern sich periodisch.

Die Erscheinung der Selbstinduktion bedingt bei Wechselströmen Komplikationen. Man hat nämlich, wenn der Selbstinduktionskoeffizient eine merkliche Grösse hat, ausser der elektromotorischen Kraft der Maschine, die auf magnetelektrische Induktion zurückzuführen ist, die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion zu berücksichtigen. Wir wollen daher zunächst annehmen, dass in dem Stromkreise keine merkliche Selbstinduktion stattfindet.

Den zeitlichen Verlauf eines Wechselstromes stellt man bildlich oder graphisch durch eine Kurve dar. Dieses Verfahren wendet man sowohl auf die elektromotorische Kraft als auch auf die Stromstärke an. Wir wollen mit der elektromotorischen Kraft beginnen. Diese werde dadurch erzeugt, dass zwei in geeigneter Weise hintereinander geschaltete Spulen (s. Fig. 83) in einem magnetischen Felde rotieren. Die Spulen sind auf einen Ring gewickelt, der mit einer Achse auf irgend eine Weise fest verbunden ist. Dreht sich also die Achse, so dreht sich auch der Ring. Die freien Drahtenden

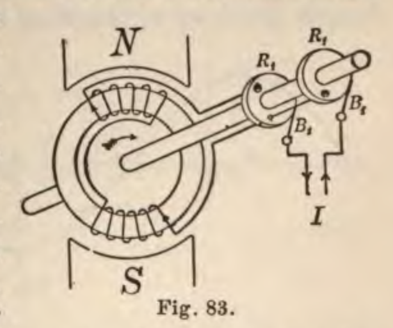


Fig. 83.

sind mit zwei auf der Achse angebrachten und gegeneinander isolierten Schleifringen R_1 aus Metall verbunden. B_1 sind zwei federnde und bei der Rotation des Ringes auf R_1 schleifende Metallstreifen. Die in den beiden Spulen induzierten elektromotorischen Kräfte addieren sich, weil ihre Drähte im entgegengesetzten Sinne gewickelt sind. Verfolgen wir eine der beiden Spulen, so finden wir, dass sich die Richtung des Stromes bezw. der elektromotorischen Kraft bei jeder Umdrehung zweimal ändert. Bezeichnen wir nun einen Strom, der in der äusseren Leitung I im Sinne der Pfeile fliesst, als positiven Strom (und ebenso die betreffende elektromotorische Kraft), so nennen wir einen Strom, der in der entgegengesetzten Richtung fliesst, einen negativen Strom.

Die Periode ist hier gleich der Zeit, in der der Ring eine Umdrehung macht bezw. in der ein Radius einen Winkel von 360° beschreibt. Da man als Maß für den Winkel den zugehörigen Bogen in einem Kreise mit dem Radius Eins (= 1 Längeneinheit, 1 cm, 1 dm, 1 m etc.) ansieht, so gehört zu einem Winkel von 360° die Zahl 2π.

Der Drehung des Ringes oder einer Spule — es genügt, eine der beiden Spulen zu verfolgen — entspricht bei der graphischen Darstellung das Fortschreiten eines Punktes[1]) auf einer Geraden (der Abszissenachse). Wenn der sich gleichmässig drehende Ring eine Umdrehung gemacht hat, so soll der sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegende Punkt eine Strecke gleich *af* zurückgelegt haben (s. Fig. 84). Unser Punkt

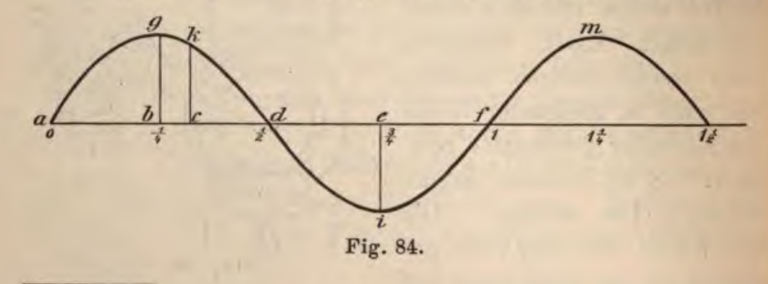


Fig. 84.

1) Statt der Drehungswinkel bezw. der zugehörigen Bogen kann man auch die den Winkeln entsprechenden Zeiten als Abszissen abtragen.

beginne seine Bewegung in *b* und zwar in dem Momente, in dem die obere Spule sich aus der in der Figur 83 gezeichneten Lage entfernt. Die induzierte elektromotorische Kraft hat jetzt ihren grössten (maximalen) Wert. Dieser werde durch das Lot *bg* dargestellt. Nehmen wir z. B. an, die elektromotorische Kraft habe in dem betrachteten Momente den Wert 100 Volt, und kommen wir dahin überein, dass 1 Volt eine Länge von 1 mm entspreche, dann müssen wir *bg* gleich 10 cm machen. Hat sich die Spule um 90° gedreht, so befindet sich unser Punkt in *d*; die elektromotorische Kraft ist gleich Null, also fällt der Endpunkt des Lotes, das ja die Länge Null haben muss, mit *d* zusammen. Dreht sich der Ring weiter, so ändert die elektromotorische Kraft ihr Vorzeichen (der Strom ändert seine Richtung); dementsprechend errichten wir die Lote, auf denen wir die der Lage unseres fortschreitenden Punktes entsprechenden induzierten Spannungen abtragen, nach unten.

Durch die Endpunkte der Lote wird eine Kurve bestimmt, durch die der Verlauf der elektromotorischen Kraft veranschaulicht wird. Jedem Punkte der Abszissenachse entspricht ein bestimmter Zustand im Stromkreise oder eine bestimmte Phase. Im Folgenden beschränken wir uns auf diejenigen Fälle, in denen die Kurve der elektromotorischen Kraft eine sogen. Sinuslinie ist.

Nennt man das positive Maximum der elektromotorischen Kraft E_0, und beträgt die Periode T Sekunden, so ist die elektromotorische Kraft zur Zeit t

$$e = E_0 \sin 2 \pi \frac{t}{T}.$$

Es sei $E_0 = 150$ Volt, $T = \frac{1}{50}$ Sekunde, dann ist zur Zeit $t = 0$ [1]) die elektromotorische Kraft $e = 0$, zur Zeit $t = \frac{1}{8}$ Periode,

---

1) Wir müssen uns vorstellen, dass der Ring in Fig. 83 zunächst um 90° gedreht wird und dass wir dann erst mit den Betrachtungen (mit der Zeitzählung) beginnen.

also $\frac{1}{400}$ Sekunde später, ist $e = 150 . \sin \frac{\pi}{4} = 150 . \sin 45^0 = 150 . \sqrt{\frac{1}{2}}$ Volt, nach abermals $\frac{1}{400}$ Sekunde ist $e = 150 . \sin \frac{\pi}{2} = 150 . \sin 90^0 = 150$ Volt.

Kennt man also die maximale elektromotorische Kraft und die Periode, die übrigens (bei uns) meistens $\frac{1}{50}$ Sekunde beträgt, so kann man beliebig viele Werte für die elektromotorische Kraft berechnen und daher auch die Spannungskurve zeichnen.

$\frac{1}{T}$, also den reziproken Wert der Periode, nennt man die Periodenzahl oder die Frequenz des Wechselstromes. Ist z. B. $T = \frac{1}{50}$ Sekunde, so ist die Frequenz gleich 50, d. h. der Strom fliesst in 1 Sekunde 50mal in der einen und 50mal in der entgegengesetzten Richtung.

Stellt man die Änderungen der Stromstärke in analoger Weise graphisch dar, wie es vorhin für die elektromotorische Kraft geschehen ist, so erhält man ebenfalls eine Sinuslinie. Man kann jedoch, wenn der Widerstand W im Stromkreise bekannt ist, aus der Spannungskurve leicht die Stromkurve erhalten. Es sei z. B. W = 2 Ohm. Man zeichne eine hinreichend grosse Anzahl von Loten auf *af* in Fig. 84 (z. B. *bg*, *kc*, *ei*) und halbiere jedes Lot. Durch die Mittelpunkte werden Punkte der Stromkurve bestimmt. Bei induktionsfreier Belastung besteht also zwischen dem Strome und der Spannung Phasengleichheit (es besteht keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung). Wenn sich also Strom und Spannung in derselben Phase befinden, so ist bei 1 Ohm Gesamtwiderstand der Strom zu jeder beliebigen Zeit so viele Ampere stark, wie die Spannung Volt beträgt.

2. Mittlere und effektive (wirksame) Stromstärke und Spannung. Die mittlere Stromstärke erhält man dadurch, dass man die Periode in sehr viele Zeitabschnitte zerlegt, für die einzelnen Intervalle die zugehörige Stromstärke ermittelt und das arithmetische Mittel bildet. Bezeichnen wir die Ströme mit J_1 bis J_n, so ist die mittlere Stromstärke

$$J_m = \frac{1}{n}(J_1 + J_2 + \ldots . J_n).$$

Man findet[1]), dass $J_m = 0{,}64\ J_0$, d. h. (angenähert) gleich 64 % der maximalen Stromstärke ist. Ebenso ist $E_m = 0{,}64\ E_0$. E_m und J_m spielen in der Praxis nur eine untergeordnete Rolle. Wenn Wechselstrom genau so elektrolysierend wirksam wäre wie Gleichstrom — was nicht der Fall ist —, so würden die Mengen der durch Elektrolyse gewonnenen Produkte, z. B. Wasserstoff und Sauerstoff bei der Wasserzersetzung, der mittleren Stromstärke proportional sein.

Wenn es sich um Arbeitsleistungen eines Wechselstromes handelt, so kommen die sogen. effektive Stromstärke und die effektive Spannung in Betracht. Um zu diesen neuen Begriffen zu gelangen, wollen wir annehmen, es fliesse durch einen induktionsfreien Widerstand von W Ohm ein Wechselstrom, dessen maximale Spannung, an den Enden des Leiters gemessen, E_0 Volt betrage. Die maximale Stromstärke ist dann gleich $\frac{E_0}{W}$ Amp., diese bezeichnen wir wieder mit J_0. In unserem Widerstande, etwa einer Glühlampe, wird durch den hindurchströmenden Wechselstrom in jeder Sekunde eine gewisse Wärmemenge erzeugt, diese betrage Q cal. Dieselbe Wärmemenge können wir uns ebenfalls in 1 Sekunde dadurch erzeugt denken, dass wir durch unseren Widerstand Gleichstrom, z. B. den Strom einer Akkumulatorenbatterie, schicken. Durch kalorimetrische Messungen werde gefunden, dass der äquivalente Gleichstrom eine Stärke von J Amp. haben muss. J liegt zwischen O und J_0 und wird als effektive Stromstärke des Wechselstromes bezeichnet. Durch Berechnungen ergibt sich, dass

$$J^2 = \frac{1}{2} J_0^2 \text{ oder } J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0.$$

---

1) Eine Ableitung der wichtigsten Formeln für Wechselströme auf elementarem Wege findet man in Bermbach-Müller, Elektrizitätswerke etc., 3. Aufl.

Der Effekt eines Gleichstromes von der Stärke $\sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0$ ist also derselbe wie derjenige eines Wechselstromes von der maximalen Stärke J_0 (daher effektive Stromstärke).

Um den Gleichstrom von der Stärke J Amp. in dem Widerstande W Ohm zu erzeugen, muss man eine gewisse Potentialdifferenz (Spannung) an den Enden des Widerstandes (des Glühfadens der Lampe) haben. Diese ist nach Seite 61 gleich J.W Volt und werde mit E bezeichnet. E heisst die effektive Spannung des Wechselstromes und ist mit E_0, der maximalen oder Scheitelspannung, durch die Gleichung verknüpft

$$E = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot E_0.$$

Da $\sqrt{\frac{1}{2}} = 0{,}71$, so beträgt die effektive Spannung 71 % der maximalen; sie ist also grösser als die mittlere Spannung.

Multipliziert man die effektive Spannung mit der effektiven Stromstärke, so erhält man die während 1 Sekunde geleistete Arbeit des Wechselstromes. Dies gilt aber nur dann, wenn zwischen Strom und Spannung keine Phasenverschiebung stattfindet (induktionsfreie Belastung). Da $J = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot J_0$ und $E = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot E_0$, so ist die Leistung auch gleich $\frac{1}{2}\, E_0 \cdot J_0$.

Mittels der für Wechselstrom eingerichteten Strom- und Spannungszeiger (Ampere- und Voltmeter) erhält man die effektive Stromstärke und die effektive Spannung. Mit diesen Grössen hat man gerade so zu rechnen, als ob man es mit Gleichstrom zu tun hätte.

Denkt man sich die Periode in sehr viele Teile zerlegt, so kann man während jedes Intervalls Stromstärke und Spannung als konstant ansehen. Auf diese Weise wird der Wechselstrom durch eine grosse Anzahl von Gleichströmen ersetzt. Nennt man die Strom-

stärken $J_1, J_2, \ldots J_n$, so ist das Quadrat der effektiven Stromstärke gleich $\frac{1}{n}(J_1^2 + J_2^2 + \ldots J_n^2)$. Es gilt daher folgende Definition [1]).

„Als wirksame (effektive) Stromstärke — oder, wenn nichts anderes festgesetzt ist, als Stromstärke schlechthin — gilt die Quadratwurzel aus dem zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Augenblicksstromstärken.“

Eine entsprechende Definition gilt für die wirksame elektromotorische Kraft.

Beispiel. Es sei $W = 20$ Ohm, $J_0 = 10$ Amp. Dann ist die effektive Stromstärke des Wechselstromes gleich 7,1 Amp., d. h. durch einen Gleichstrom von 7,1 Amp. wird in einem Widerstande von 20 Ohm in derselben Zeit dieselbe Wärmemenge erzeugt wie durch einen Wechselstrom, dessen maximale Stromstärke gleich 10 Amp. ist. Die maximale Spannung des Wechselstromes, an den Enden des Widerstandes gemessen, muss $10 . 20$ Volt betragen; die effektive Spannung ist gleich $200\sqrt{\frac{1}{2}} = 142$ Volt. Dies ist auch die Spannung des äquivalenten Gleichstromes.

3. Einfluss der Selbstinduktion. Wie wir gesehen haben, wird in einer Spule eine elektromotorische Kraft induziert, wenn sich die Stärke des hineingeschickten Stromes ändert. Da sich nun bei einem Wechselstrome die Stromstärke fortwährend, und zwar sehr schnell, ändert, so folgt, dass hier die Selbstinduktion eine sehr wichtige Rolle spielen muss.

Man finde z. B., dass die effektive Stromstärke gleich 7 Amp. ist; dann ist die maximale Stromstärke rund 10 Amp. Der Strom fällt also in $\frac{1}{4}$ Periode um 10 Amp. Ist die Periode gleich $\frac{1}{50}$ Sek., so ändert sich die Stromstärke in der sehr kurzen Zeit von $\frac{1}{200}$ Sek. um 10 Amp. Dem entspricht eine sekundliche Änderung der Stromstärke um 2000 Amp.

Der Einfluss der Selbstinduktion ergibt sich aus folgendem Versuche: Ein Elektromagnet, dessen Spule einen Widerstand von 0,15 Ohm hat, wurde mit einem Akkumulator verbunden; der Strom, der durch einen kleinen Widerstand ab-

1) Siehe Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 435.

geschwächt wurde, hatte eine Stärke von 6 Amp. Ein mit den Klemmen des Elektromagnets verbundenes Voltmeter zeigte eine Spannung von 6.0,15 = 0,9 Volt an. Darauf wurde der Elektromagnet an eine Wechselstromquelle angeschlossen, der Strom so reguliert, dass er wieder 6 Amp. (effektiv) stark war und mittels eines Wechselstromvoltmeters die Spannung an den Klemmen des Elektromagnets gemessen. Sie betrug jetzt 10,2 Volt. Näherte man den Polen weiches Eisen, einen Anker, so wurde die Potentialdifferenz noch grösser, sie stieg bis zu 12 Volt. Der Elektromagnet verhält sich also bei angelegtem Anker so, als ob er einen Widerstand von $\frac{12}{6} = 2$ Ohm hätte [1]). Es wäre nun falsch, anzunehmen, dass in der Spule und in dem Eisen (Hysteresisverluste, Wirbelströme) in 1 Sek. 12.6 = 72 Watt in Wärme umgesetzt werden. 72 Watt ist als die scheinbare Leistung des Wechselstromes zu bezeichnen. Dass die Spannung bei Benutzung von Wechselstrom grösser ist bei Gleichstrom, ist auf die Selbstinduktion zurückzuführen. Beginnen wir unsere Betrachtungen mit dem Momente, in dem die elektromotorische Kraft der Maschine den Wert Null hat und anfängt positiv zu werden. Zunächst verhindert die Selbstinduktion das Anwachsen des Stromes (erstes Viertel der Periode). Wird die elektromotorische Kraft der Maschine kleiner (zweites Viertel), so widersetzt sich die Selbstinduktion der Abnahme des Stromes. Wechselt die Spannung der Maschine ihr Vorzeichen, so hat i noch einen positiven Wert, der Strom fliesst noch eine Zeitlang in der alten Richtung weiter. Erst wenn die Maschinenspannung einen gewissen negativen Wert erreicht hat, kehrt sich der Strom um. Der Strom hat also in keinem Momente den der elektromotorischen Kraft der Maschine [2]) und dem Ohmschen Widerstande entsprechenden

---

1) Bei einem induktionsfreien Widerstande stimmen die beiden Spannungen überein, und der Quotient aus der gemessenen (effektiven) Spannung und der gemessenen Stromstärke ist der wirkliche Widerstand.

2) Um Irrtümern vorzubeugen, sei darauf aufmerksam gemacht, dass die elektromotorische Kraft der Maschine durch die Selbstinduktion in

Wert. Beträgt also in einem bestimmten Momente die Spannung e Volt, und ist der wirkliche Widerstand im Stromkreies gleich w Ohm, so ist der Strom **nicht** gleich $\frac{e}{w}$; diesen Wert erreicht der Strom erst etwas später (ev. gar nicht). Strom und Spannung befinden sich nicht mehr, wie bei induktionsfreier Belastung, in derselben Phase, wohl aber haben beide die gleiche Periode. Da der Strom hinter der Spannung zurückbleibt, so sagt man, der Strom habe **Nacheilung**. Stellt man also die zeitliche Änderung der elektromotorischen Kraft (der Maschine) und diejenige der Stromstärke gleichzeitig unter Benutzung derselben Abszissenachse dar, so fallen die Punkte, in denen die beiden Kurven die Achse schneiden, nicht zusammen. Man erhält ein ähnliches Bild wie in Fig. 86 (S. 152), also zwei gegeneinander verschobene Kurven.

Wenn der Strom $\frac{1}{4}$ Periode später im Maximum ist als die Spannung, so sagt man, die Phasenschiebung betrage 90°. Auf diesen Fall würde sich die Fig. 86 beziehen. Die Grösse der Phasenverschiebung hängt ab von dem Selbstinduktionskoeffizienten, dem (Ohmschen) Widerstand und der Periodenzahl (s. d. f. Seite).

Werden die beiden Belegungen eines **Kondensators** mit einer Wechselstromquelle verbunden, so findet ebenfalls eine Phasenverschiebung statt. Man beachte z. B., dass der Kondensator sich entlädt, also Strom in die Leitung schickt, wenn die elektromotorische Kraft der Maschine Null ist. Jedoch hat der Strom jetzt **Voreilung**. Selbstinduktion und Kapazität wirken also im entgegengesetzten Sinne.

Da sich eine Spule allen Änderungen der Stromstärke, welche die Maschinenspannung herbeiführen will, gleichsam widersetzt, so zeigt sie Wechselstrom gegenüber ein solches Verhalten, als ob sie einen grösseren Widerstand hätte als bei Gleichstrom. Man unterscheidet demgemäss in der Wechselstromtechnik zwischen dem **wirklichen** (Ohmschen) und

---

der Elektromagnetspule nicht beeinflusst wird; denn diese hängt ja lediglich von der Anzahl der Kraftlinien ab, welche von den Ankerdrähten in 1 Sekunde geschnitten werden.

dem scheinbaren Widerstand. Letzteren nennt man auch die Impedanz.

Bei dem für den besprochenen Versuch benutzten Elektromagnet ist also der Ohmsche Widerstand gleich 0,15 Ohm und die Impedanz gleich 2 Ohm.

Die effektive (gemessene) Stromstärke ist gleich der effektiven Spannung dividiert durch die Impedanz.

Nennt man die Impedanz w', den Ohmschen Widerstand w, die Periodenzahl oder Frequenz n und den Selbstinduktionskoeffizient L, so ist

$$w' = \sqrt{w^2 + (2\pi n L)^2}.$$

Kennt man daher w' und w, so kann man L berechnen.

Beispiel: Durch eine Spule, deren Ohmscher Widerstand 0,5 Ω beträgt, werde ein Wechselstrom von 50 Perioden geschickt. Die an den Klemmen gemessene Spannung betrage 30 Volt, die Stromstärke 6 Amp. Wie gross ist der Selbstinduktionskoeffizient der Spule?

Man berechne zuerst die Impedanz w':

$$w' = \frac{30}{6} = 5 \text{ Ohm}.$$

In der Gleichung $w' = \sqrt{w^2 + (2\pi n L)^2}$ ist jetzt nur L unbekannt. $(2\pi n L)^2 = w'^2 - w^2 = 24{,}75$ oder

$100 . 3{,}14 . L = \sqrt{24{,}75} = 5$ (angenähert) und

$L = 0{,}016$ Henry.

Den Phasenverschiebungswinkel φ erhält man, wie hier nicht nachgewiesen werden kann, aus der Gleichung

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{2\pi n L}{w}.$$

φ ist ungefähr gleich $78^0\ 50'$. Machen wir uns noch klar, was das heisst. Ist $\varphi = 1^0$, so hat der Strom, da einer Periode 360^0 entsprechen, $\frac{1}{360} \cdot \frac{1}{50}$ Sek. (allgemein $\frac{1}{360} . T$ Sek.) später den Wert Null als die Spannung des Wechselstromes; bei 79^0 also — um abzurunden — $\frac{79}{360} \cdot \frac{1}{50}$ Sek. später. Da in Fig. 84 (S. 142) einer Periode, in unserem Falle $\frac{1}{50}$ Sek., die Strecke af entspricht, so liegt der zu a zugehörige Schnittpunkt der Stromkurve mit der Achse von a um das Stück $\frac{79}{360} . af = 0{,}22 . af$ entfernt (nach rechts).

Die **Leistung eines Wechselstromes in einem induktiven Widerstand** ist nicht (wie bei induktionsfreier Belastung) durch das Produkt aus der gemessenen (effektiven) Spannung E und der gemessenen Stromstärke J gegeben, sondern man hat dieses Produkt noch mit einem gewissen Faktor zu multiplizieren, der kleiner als 1 ist. Dieser Faktor ist der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ.

Arbeit pro Sek. = Leistung = $E . J . \cos \varphi$ Watt.

Dass die Leistung jetzt nicht durch E.J gegeben ist, ergibt sich folgendermaßen: Man bestimmt die Leistung in der Weise, dass man sich eine Periode in sehr viele Zeitabschnitte zerlegt denkt, die so klein sind, dass man Strom und Spannung während derselben als konstant ansehen kann, bildet die Arbeit während eines jeden Intervalls und addiert die Einzelarbeiten. Die Augenblicksspannungen seien E_1, E_2, ... E_n, die Augenblicksstromstärken J_1, J_2, ... J_n. Weil nun bei induktionsfreier Belastung $J_1 = \frac{E_1}{W}$, $J_2 = \frac{E_2}{W}$ etc., wo W der wirkliche (Ohmsche) Widerstand ist, führt die Addition zu dem einfachen Endresultate, dass E.J.T die Arbeit während einer Periode und daher E.J die Leistung ist. Bei induktiver Belastung, d. h. wenn Selbstinduktion stattfindet, gelten die Beziehungen $J_1 = \frac{E_1}{W}$ etc. nicht mehr; denn wenn $E = 0$, ist J nicht gleich Null. Daher wird die Berechnung auch zu einem anderen Endresultate führen.

Das Produkt E.J bezeichnet man als die **scheinbare Leistung**, während $E . J . \cos \varphi$ die **wirkliche Leistung** ist. Diese letztere erhält man mittels des Wattmeters, indem man die Messung genau so ausführt wie bei Gleichstrom. Kennt man die wirkliche Leistung, ferner E und J, so kann man $\cos \varphi$ berechnen

$$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkliche Leistung}}{\text{Scheinbare Leistung}}.$$

Die scheinbare Leistung drückt man in Volt-Ampere aus. Findet man also, dass bei einem Elektromagnet die Klemmenspannung gleich 12 Volt und die Stromstärke gleich 6 Ampere ist, so sagt man, dass die scheinbare Leistung 72 Volt-Ampere beträgt.

Der Energieverlust durch Stromwärme wird gerade so wie bei Gleichstrom berechnet, er beträgt also pro Sekunde $w . J^2$ Watt, wenn w der wirkliche Widerstand und J die gemessene (effektive) Stromstärke ist.

II. Zweiphasenströme.

Eine Zweiphasenstrommaschine ist in Fig. 85 schematisch dargestellt. Auf dem Eisenringe *r* befinden sich zwei Paar Spulen, die um 90° voneinander entfernt sind; die vier Enden sind mit den Schleifringen R_1 und R_2 verbunden. Bei der Rotation des Ringes erhalten wir also zwei voneinander unabhängige Ströme. Wenn im ersten Stromkreise die elektromotorische

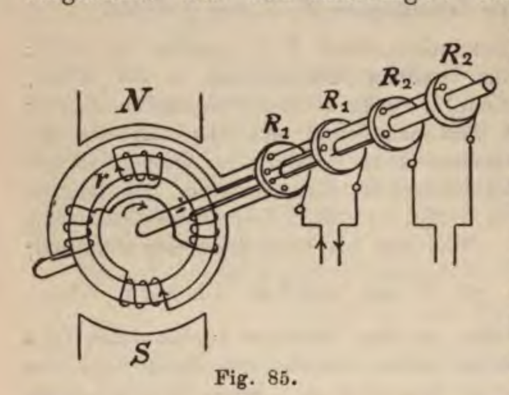


Fig. 85.

Kraft im Maximum ist, hat sie im zweiten den Wert Null. Nach 1 Viertel-Umdrehung hat die elektromotorische Kraft des zweiten Spulenpaares ihren Höchstwert, im ersten ist sie Null etc. Stellt man also den Verlauf der beiden elektromotorischen Kräfte in der früher beschriebenen Weise graphisch dar, so erhält man zwei Sinuslinien, die um 90° oder 1/4 Periode

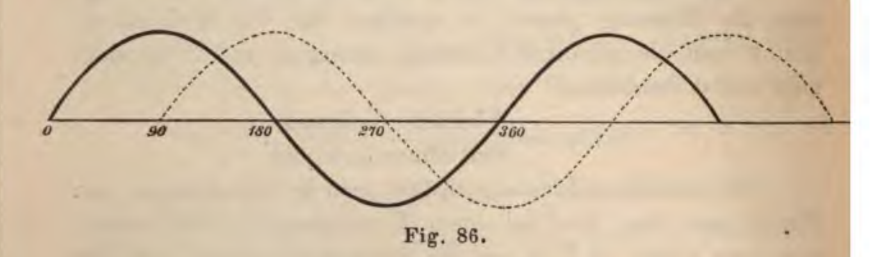


Fig. 86.

gegeneinander verschoben sind (siehe Fig. 86). Der **Zweiphasenstrom besteht also aus zwei einphasigen**

Wechselströmen, die eine Phasenverschiebung von 90° besitzen.

Hat zur Zeit t die eine der beiden elektromotorischen Kräfte den Wert

$$e_1 = E_0 . \sin 2 \pi \frac{t}{T},$$

so ist die andere

$$e_2 = E_0 . \sin \left(2 \pi \frac{t}{T} - \frac{\pi}{2}\right).$$

Der Zweiphasenstrom erfordert vier Leitungen, wie man aus der Fig. 86 ersieht. Man kann jedoch bei nicht zu hohen Spannungen zwei der vier Leiter zu einem vereinigen. Die Leitung besteht dann aus zwei dünneren und einem dickeren Drahte.

Da der Zweiphasenstrom nur selten Anwendung findet, so kann von einer eingehenderen Besprechung desselben abgesehen werden.

III. Dreiphasenstrom, Drehstrom.

Denken wir uns den Ring in Figur 85 mit drei Spulen bewickelt, die 120° voneinander entfernt sind, und die sechs Drahtenden mit sechs Schleifringen verbunden, so erhalten wir das nicht verkettete oder offene Dreiphasensystem. Bei diesem ist also jeder Stromkreis von den anderen unabhängig.

Nennt man zu einer beliebigen Zeit die elektromotorischen Kräfte e_1, e_2, e_3, so ist $e_1 + e_2 + e_3 = 0$. Sind die Widerstände in den drei Stromkreisen einander gleich, so ist auch in jedem Momente die Summe der drei Ströme gleich Null. Hierbei ist zu beachten, dass man Strom, der in der einen Richtung, etwa von der Maschine weg fliesst, als positiven Strom anzusehen, und Strom, der in der entgegengesetzten Richtung fliesst (nach der Maschine hin), negativ in Rechnung zu setzen hat.

Wenn man daher von jeder Phase — so nennt man die drei Stromkreise — einen der beiden Leitungsdrähte nimmt und die drei Leitungen zu einer einzigen vereinigt, so ist die

gemeinsame Rückleitung stromlos und kann daher in Wegfall kommen. Man gelangt so zu der in Fig. 87 skizzierten Anordnung.

Wie man sieht, sind die drei Anfänge der Spulen mit den Schleifringen R_1, R_2, R_3 verbunden und die drei Enden

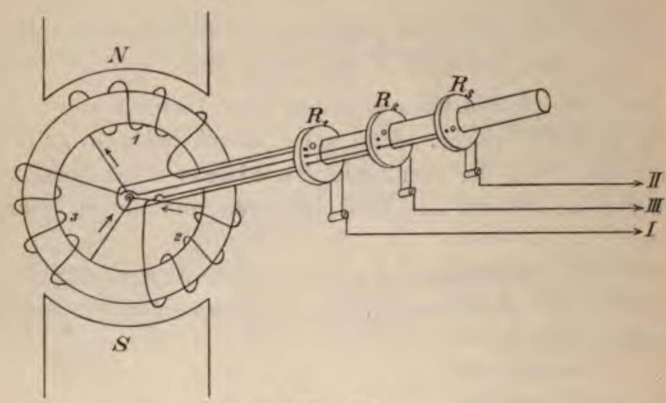


Fig. 87.

nach einem Punkte hingeführt. Die drei Stromkreise sind jetzt miteinander verkettet, und man nennt das verkettete Dreiphasensystem kurz Drehstrom, weil man, wie später gezeigt wird, mittels desselben ein rotierendes magnetisches Feld, ein Drehfeld, erzeugen kann.

Der weiteren Besprechung des Dreiphasensystems soll eine Analogie vorausgeschickt werden. Die beiden mit Wasser gefüllten Behälter *A* und *B* in Fig. 88 sind durch drei Röhren, in denen sich dicht schliessende Kolben befinden, miteinander verbunden. Bewegen wir einen Kolben nach rechts, die beiden anderen nach links, so drückt der erste Kolben Wasser in *B* hinein, während die beiden anderen Wasser aus *B* saugen und es in den Behälter *A* befördern. Wenn nun infolge passender Wahl der Geschwindigkeiten der erste Kolben so viel Wasser in *B* hineindrückt, wie die beiden anderen zusammen aus *B* heraussaugen, so ändert sich weder in *A* noch in *B* das Niveau.

Die Teile der Röhren, in denen sich die Kolben hin- und herbewegen, entsprechen den drei Spulen, die übrigen Röhrenstücke den Leitungen *I*, *II*, *III* in Figur 87, das Reservoir *B* spielt die Rolle des sogenannten **neutralen Punktes**; es ist dies derjenige Punkt, in dem die drei Anfänge der Spulen zusammenlaufen (siehe Fig. 87).

Die Analogie bezieht sich nur auf einen bestimmten Moment bezw. auf eine bestimmte Lage der drei Spulen. Will man dem

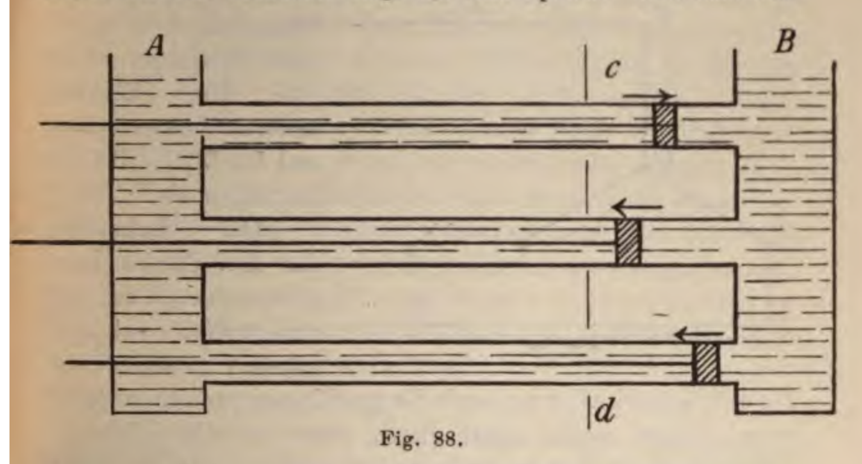


Fig. 88.

Umstande Rechnung tragen, dass sich die Spannung in jeder der Spulen bezw. die Stromstärke und Stromrichtung in jeder der drei Leitungen periodisch ändern, so muss man annehmen, dass jeder der drei Kolben, nachdem er um ein bestimmtes Stück vorgerückt ist (bis cd), zurückgeht und dass sich seine Geschwindigkeit, etwa wie diejenige eines Pendels, periodisch ändert.

Nehmen wir jetzt an, die Elektrizität sei eine sehr feine Flüssigkeit, ein Fluidum. Hat der rotierende Ring die in Fig. 87 fixierte Lage, so fliesst Elektrizität durch die Leitung *I*[1]) in einem gewissen Sinne, sagen wir von links nach rechts; in den Spulen 2 und 3 aber werden Ströme induziert, die in den Leitungen *II* und *III* von rechts nach links fliessen. Es saugt also gleichsam Spule 1 Elektrizität aus den Spulen 2 und 3 heraus. Hat sich der Ring um 60° gedreht, so fliessen

1) Man denke sich die drei Leitungen am Ende ebenfalls miteinander verbunden (s. Fig. 91).

die Ströme in den Leitungen *I* und *III* von der Maschine fort und ihre Summe durch die Leitung *II* zur Maschine zurück.

Die in Fig. 87 angedeutete Schaltung nennt man die Sternschaltung (auch wohl die offen verkettete Schaltung). Diese wird schematisch in der Fig. 89 dargestellt, in der oa, ob, oc den drei Wickelungen (Phasen) einer Dynamomaschine (oder eines Elektromotors) entsprechen, und L_1, L_2, L_3 die drei Leitungen sind.

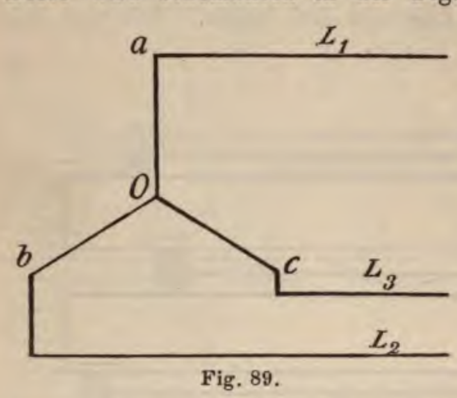


Fig. 89.

Die Verkettung der drei Phasen kann aber auch noch auf eine andere Weise erfolgen, nämlich nach der Dreiecksschaltung (auch die geschlossen verkettete Schaltung genannt). Man erhält diese, wenn man das Ende der ersten Spule mit dem Anfang der zweiten, das Ende der zweiten Spule mit dem Anfang der dritten und das Ende der dritten Spule mit dem Anfang der ersten verbindet. Fig. 90 stellt diese Schaltung im Schema dar. Die drei Leitungen werden an die Punkte a, b, c angeschlossen. Bewickelt man also einen Ring gleichmässig mit Draht (siehe Fig. 96, S. 162), und benutzt man drei um 120° entfernte Punkte der Wickelung (unter Zuhülfenahme von Schleifringen und Bürsten) als Anschlusspunkte für die äusseren Stromleiter, so erhält man einen nach der Dreiecksschaltung gewickelten Anker.

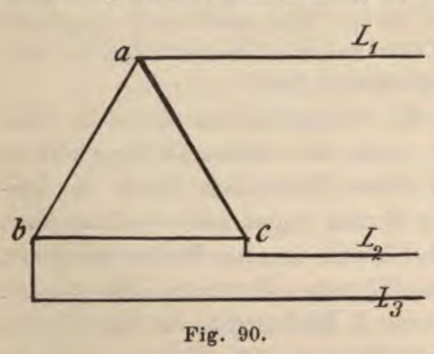


Fig. 90.

Wir wollen noch ganz kurz die beiden Schaltungen miteinander vergleichen.

a) Die Sternschaltung. Da die äussere Leitung L_1 mit der Spule *o a* (Spule 1 in Fig. 87) hintereinander geschaltet ist, so ist es klar, dass in jedem Momente der Phasenstrom gleich dem Leitungsstrome ist. Denken wir uns ferner ein Voltmeter (für Wechselstrom) mit den Punkten *o* und *a* verbunden, so zeigt dieses eine gewisse Spannung an; diese nennt man die effektive Phasenspannung. Sie hat für alle drei Phasen denselben Wert. Natürlich gilt dies nicht von den momentanen Phasenspannungen. Verbindet man ferner ein Voltmeter mit zwei Leitungen, z. B. mit L_1 und L_2 oder mit *a* und *b*, so erhält man die effektive verkettete Spannung. Diese ist gleich der effektiven Phasenspannung mal $\sqrt{3}$.

Wenn von der Spannung bei Drehstrom gesprochen wird ohne einen Zusatz, so ist die verkettete effektive Spannung (Spannung zwischen zwei Hauptleitungen) [1] zu verstehen. Diese Definition gilt auch für die Dreiecksschaltung.

Die Lampen werden gleichmässig auf die drei Phasen verteilt. Man schaltet also die erste Lampe zwischen die Leitung 1 und Leitung 2, die zweite zwischen 2 und 3 und die dritte zwischen 3 und 1 etc. (siehe Fig. 91). Motoren werden mit den drei Leitungen verbunden. Allgemein ist nun die äussere Leistung gleich $\sqrt{3}$ $\times$ der effektiven Spannung zwischen zwei Leitungen $\times$ dem Strome in einer Leitung (effektiv) $\times$ Cosinus des Phasenverschiebungswinkels. Sind nur Glühlampen, allge-

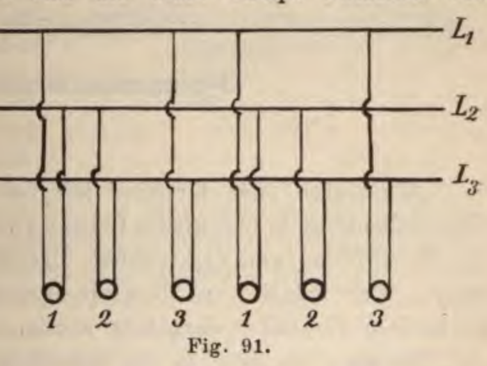


Fig. 91.

1) Siehe Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 477.

mein induktionsfreie Widerstände, eingeschaltet, so ist $\varphi = 0$ oder $\cos \varphi = 1$, so dass der letzte Faktor in Wegfall kommt.

b) Dreiecksschaltung. Was eben für den Strom galt, gilt jetzt für die Spannung und umgekehrt. Da z. B. a und b zugleich Punkte der Leitungen sind, so ist die Spannung zwischen zwei Leitungen gleich der Phasenspannung. Dagegen sind Phasenströme und Leitungsströme voneinander verschieden. Denn in den Punkten, in denen die Leitungen abzweigen, haben wir Stromverzweigungen. Die Berechnungen ergeben, dass der effektive Leitungsstrom gleich $\sqrt{3}$ mal dem effektiven Strome in einer Phase ist.

Über die Schaltung der Lampen und Motoren gilt dasselbe wie eben. Die Leistung wird wie bei der Sternschaltung bestimmt (siehe auch Messinstrumente und Messmethoden).

Warum man bei Kraftübertragungen statt des einfachen Gleichstromsystems das kompliziertere Drehstromsystem verwendet, wird später gezeigt.

Elftes Kapitel.

Dynamomaschinen.

„Generator oder Dynamo ist jede rotierende Maschine, die mechanische in elektrische Leistung verwandelt“ (Normalien für die Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren). Das Prinzip, auf dem die Dynamomaschinen beruhen, ist in dem Kapitel 9 dargelegt worden.

Die erste Maschine, in der elektrische Ströme durch magnetelektrische Induktion erzeugt wurden, konstruierten Pixii und Dal Negro (1832). Die sich rasch weiter entwickelnden Maschinen lieferten anfangs nur Wechselstrom, später, von 1836 an, Gleichstrom; sie wurden hauptsächlich für Laboratoriumszwecke benutzt, bis W. von Siemens das später zu besprechende Dynamoprinzip fand (1867). Bei der Maschine von Pixii wurde ein

Hufeisenmagnet um eine vertikale Achse gedreht; bei der Maschine von Stöhrer stand der Magnet fest, während der Anker rotierte. Die Maschinen von Pixii und Stöhrer haben heute keine Bedeutung mehr, da sie aber zur Einführung in das Verständnis der neueren Maschinen geeignet sind, so soll ihnen eine kurze Besprechung gewidmet werden.

M in Fig. 92 sei ein horizontal liegender permanenter Magnet mit den Polen *N* und *S*. Die Achse *A A'* ruht mit ihrem zugespitzten Ende *A* in einer Vertiefung in *M*; an ihrem unteren Ende ist die Kurbel *K* befestigt. Mit der Achse fest verbunden ist eine Eisenplatte, auf der die beiden Induktionsspiralen *D* und *D'* stehen, in deren Hohlräumen sich weiche Eisencylinder befinden (man vergleiche die Betrachtungen über die Permeabilität und über den magnetischen Kreis). Ferner sieht man auf *A A'* zwei ringförmige Metallwülste *W* und *W'* (Schleifringe); diese sind durch isolierende Kautschukringe von der Achse getrennt. *F* und *F'* endlich sind federnde auf *M* festgeschraubte Metallstreifen; dreht sich die Achse, so schleifen *F* und *F'* auf den Ringen *W* und *W'*. Die Spulen nebst den Eisenkernen und der Platte bilden den Anker. Wird der Anker aus der in der Figur fixierten Lage gedreht, so nimmt die Zahl der die Windungen durchsetzenden Kraftlinien ab, und es werden elektromotorische Kräfte induziert. Die in den einzelnen Windungen der Spule *D* induzierten Spannungen addieren sich, ebenso verstärken sich die in den Windungen *D'* erzeugten Stromimpulse. Dagegen haben die in den Windungen *D* induzierten Ströme die entgegengesetzte Richtung wie die Ströme in *D'*. Da nun der Draht auf *D'* im entgegengesetzten Sinne gewickelt ist, wie der Draht auf *D* (wie bei einem Hufeisen-Elektromagnet), so erhalten in bezug auf den äusseren Stromkreis beide Ströme dieselbe

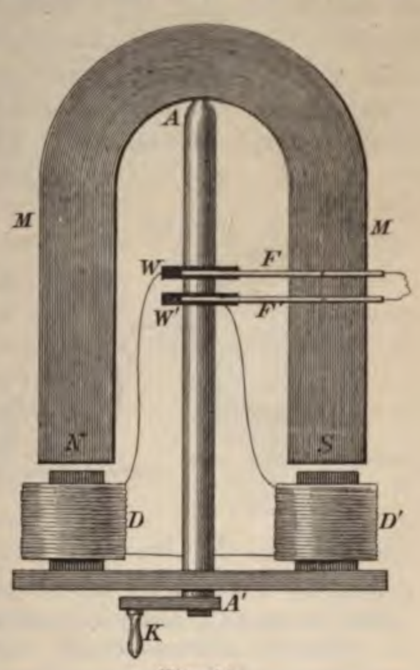


Fig. 92.

Richtung, sie verstärken sich, wie man aus der Figur 93 leicht erkennt.

Bei jeder Umdrehung werden sowohl in D als auch in D' zwei Ströme entgegengesetzter Richtung erzeugt. Man erhält daher in der äusseren Leitung Wechselströme.

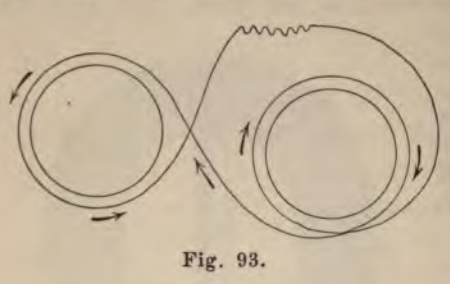


Fig. 93.

Sollen alle Ströme in der Nutzleitung in demselben Sinne fliessen, so muss man auf der Achse statt der Schleifringe W und W' eine besondere Vorrichtung anbringen, den sogenannten Kommutator. Er besteht aus einem isolierenden Ringe r (s. Querschnitt, Fig. 94), auf dem zwei Stücke von Metallcylindern a und b befestigt sind, die mit den Enden der Spulen D und D' verbunden werden. Zwei federnde Metallstreifen c und d drücken sich gegen den Kommutator und schleifen bei der Rotation auf ihm. Die Federn werden so gestellt, dass jede derselben in dem Momente, in dem die induzierte elektromotorische Kraft ihr Vorzeichen wechselt, von dem einen Halbcylinder auf den anderen übergeht (Stellung II). Man erhält jetzt pulsierenden Gleichstrom in der äusseren Leitung.

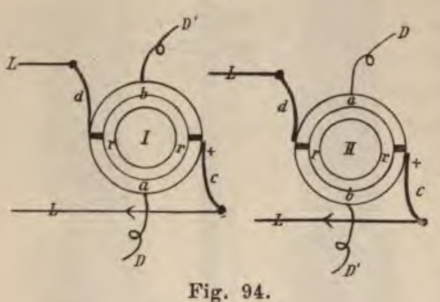


Fig. 94.

Wie in der vorstehend beschriebenen Maschine, so werden in jeder Dynamo zunächst Wechselströme erzeugt. Obschon also Wechselstrommaschinen in konstruktiver Beziehung einfacher sind als Gleichstrommaschinen, so wollen wir dennoch, einem allgemeinen Gebrauche folgend, mit den letzteren beginnen.

I. Gleichstrommaschinen.

Im Jahre 1864 ersetzte Pacinotti die Induktionsspulen Pixiis durch eine fortlaufende, in sich geschlossene Ringwickelung und entdeckte den vielteiligen Kommutator. „Gramme

machte dann im Jahre 1870 nochmals dieselbe Erfindung wie Pacinotti, gab ihr jedoch eine praktische Form, die seinen Namen trägt und das Muster für alle Dynamomaschinen mit geschlossener Ankerwickelung geworden ist[1])."

1. **Der Grammesche Ring.** Ein Ring möge sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde befinden. Ein solches erhält man angenähert, wenn man auf den Polflächen eines Hufeisenmagnets cylindrisch ausgedrehte Ansätze aus weichem Eisen befestigt (siehe Fig. 95). Die Kraftlinien werden durch die geraden Linien dargestellt. Eine Drahtschleife A befinde sich bei J_1 auf einem Holzringe und werde N genähert; die Anzahl der A durchsetzenden Kraftlinien[2] nimmt ab; es wird also in A ein Strom induziert, der, so lange die Bewegung dauert, in demselben Sinne zirkuliert. Verschiebt man den Draht über N hinaus, so nimmt die Zahl der durch seine Fläche gehenden Kraftlinien zu; trotzdem hat der in A induzierte Strom während der Bewegung von 90° bis 180° dieselbe Richtung wie eben.

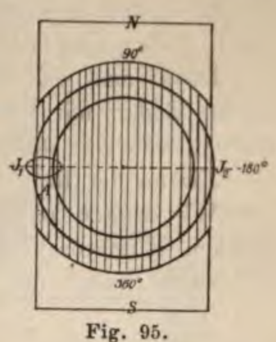


Fig. 95.

Der Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung kann folgendermaßen geführt werden. Nach dem Gesetze von Lenz (siehe S. 114) muss der induzierte Strom eine solche Richtung haben, dass infolge der Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetpol — zunächst kommt hauptsächlich N in Betracht — die Bewegung gehemmt wird. Ferner haben wir gesehen, dass man sich einen Kreisstrom, wenn man die Kräfte, die Stromleiter und Magnete aufeinander ausüben, betrachten will, durch einen Magneten senkrecht zur Ebene des Kreisstromes ersetzt denken kann. Während der Bewegung von 0° bis 90° muss der Nordpol des gedachten Magnets nach oben gerichtet sein (Abstossung); bewegt man A weiter, so wendet sich, wenn der Strom in dem Drahtringe, wie behauptet wurde, seine Richtung n i c h t ändert, der Südpol nach oben, es erfolgt also eine Anziehung, wie es sein muss.

---

1) K a p p, Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom. 4 Aufl
2) Nach K i t t l e r, Handbuch der Elektrotechnik.

In der Lage 180° ist die Anzahl der durch die Fläche tretenden Kraftlinien wieder ein Maximum, bei der weiteren Bewegung nimmt sie ab; der Strom muss aber jetzt seine Richtung ändern etc. Statt den Drahtring über den feststehenden Holzring zu schieben, können wir uns *A* fest auf den Ring gelegt denken und diesen letzteren rotieren lassen. Der induzierte Strom wechselt also bei jeder Umdrehung des Ringes zweimal sein Zeichen und zwar beim Durchgange durch J_1 und J_2. Eine die Punkte J_1 und J_2 verbindende Gerade heisst indifferente Linie oder neutrale Zone.

Denkt man sich den Drahtring *A* aufgeschnitten und die beiden Enden mit zwei Schleifringen verbunden, an deren Bürsten sich eine äussere Leitung anschliesst, so fliesst durch diese, wenn der Ring rotiert, Wechselstrom.

Wir denken uns jetzt einen Holzring mit einem langen, blanken Kupferdraht bewickelt, so dass eine in sich geschlossene Spirale mit einer grösseren Anzahl von Windungen entsteht (Fig. 96). Der Ring drehe sich in einem homogenen magnetischen Felde, das durch die Pole *N* und *S* erzeugt werden möge. Auf jede einzelne Windung kann man die vorigen Betrachtungen übertragen. Man kann sich also den Anker in zwei bei i und i_1 zusammenstossende Hälften zerlegt denken, die wir als rechte und linke Hälfte unterscheiden wollen, so zwar, dass sich die in den sämtlichen Windungen der rechten Hälfte induzierten elektromotorischen Kräfte addieren, ebenso diejenigen in der linken Hälfte, während die Ströme in den beiden Teilen entgegengesetzt gerichtet sind. Nehmen wir an, dass die in der linken Hälfte induzierten Ströme nach i hinfliessen, so gehen auch die Ströme, die rechts induziert werden, nach i hin. Träfen sich also die Ströme in der Spirale, so würden sie sich bekämpfen; werden

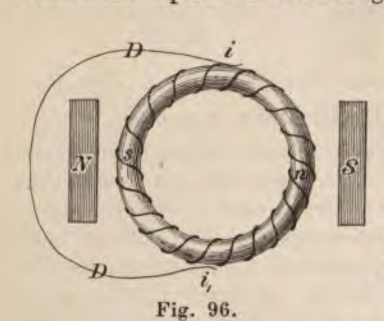


Fig. 96.

sie aber durch einen Draht D, der in den beiden Indifferenzpunkten i und i_1 die Spirale berührt (Fig. 96), aufgefangen, so fliessen beide, wie man aus der Figur 97 ersieht, in derselben Richtung durch D. Der Strom fliesst durch die äussere Leitung nach i_1 und in die Spirale zurück, ist also geschlossen. Die Anordnung entspricht mithin zwei parallel geschalteten Elementen, d. h. die beiden Hälften der Ringwickelung sind in Bezug auf den äusseren Strom J parallel geschaltet, durch jede fliesst der Strom $\frac{J}{2}$.

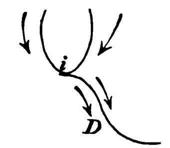


Fig. 97.

Der wirklichen Ausführung des Ringankers mit Kommutator kommt die schematische Figur 98 nahe. Die Windungen des Ringes sind durch Drähte mit dem Kommutator verbunden. Dasjenige Stück der Wickelung, das zwischen zwei aufeinander folgenden Verbindungsdrähten liegt, bezeichnet man allgemein als Ankerspule, auch wenn dieses Stück, wie in der Figur, nur aus einer Windung besteht. Der Kommutator, der auf der Drehungsachse festgekeilt ist, besteht nun aus so vielen der Achse parallel laufenden Kupferstreifen (Lamellen), wie der Anker Spulen hat. Die Lamellen werden in Fig. 98 durch kleine Kreise dargestellt, in Fig. 99 (S. 164) sind sie mit r bezeichnet (s. auch Fig. 100). Bestehen die Ankerspulen aus zwei und mehr Windungen, so werden das Ende einer Spule und der Anfang der folgenden Spule mit derselben Lamelle verbunden. Das Ganze bildet also eine zusammenhängende Leitung (s. Fig. 99).



Fig. 98.

Ein Ringanker mit zwölfteiligem Kommutator ist in Fig. 100 abgebildet. Die Verbindungen zwischen den Lamellen des Kollektors (Kommutators) und den Spulen werden durch doppeldrähtige Leitungsschnüre hergestellt.

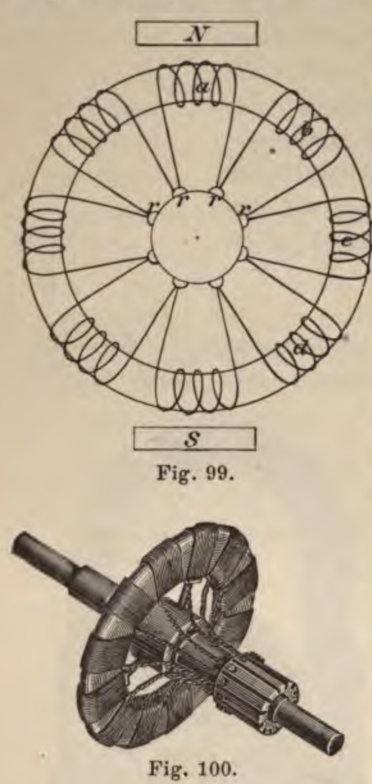


Fig. 99.

Fig. 100.

Auf dem Kommutator liegen (bezw. schleifen bei der Drehung des Ankers) die **Bürsten** (s. Fig. 98); sie bestehen aus Kupfergewebe oder aus Kohle. Kohlenbürsten verwendet man besonders bei Maschinen für hohe Spannungen. Die Bürsten stellen, wenn der Anker rotiert, ruhende Verbindungen zwischen dem Kommutator und der äusseren Leitung dar. Wir wollen annehmen, dass die induzierten Ströme in beiden Ringhälften nach oben fliessen, wie es durch die kleinen Pfeile der Fig. 98[1]) angedeutet wird. Die Ströme werden durch denjenigen Verbindungsdraht gesammelt, der sich in dem betrachteten Momente in der neutralen Zone befindet, fliessen nach der betreffenden Lamelle, gehen von dort in die obere Bürste, gelangen, nachdem sie den äusseren Stromkreis durchflossen haben, in die untere Bürste, in die betreffende Lamelle, den Verbindungsdraht. Dort findet eine Teilung statt; die eine Hälfte durchströmt die rechte, die andere die linke Ringhälfte.

Bis jetzt haben wir angenommen, dass das Material, aus dem der Ring besteht, Holz sei. In Wirklichkeit besteht der

1) Von der Wickelung auf den Schenkeln des Hufeisenmagnets sehen wir einstweilen ab und nehmen an, dass ein permanenter Magnet verwendet wird.

Ankerkern aus Eisen. Dadurch, dass man Eisen in das magnetische Feld bringt, erzielt man eine Vergrösserung der wirksamen Kraftlinienzahl (s. Permeabilität und magnet. Kreis). Die am Nordpol austretenden Kraftlinien suchen den Ring auf, durchdringen ihn, verlassen in der Nähe des Südpols den Anker und gehen durch das die beiden Polschuhe verbindende Eisen, das Joch, zum Nordpol zurück (s. Fig. 101). Da jetzt eine in der neutralen Zone liegende Windung eine bedeutend grössere Anzahl von Kraftlinien umfasst als früher, so ist die mittlere induzierte elektromotorische Kraft wesentlich grösser.

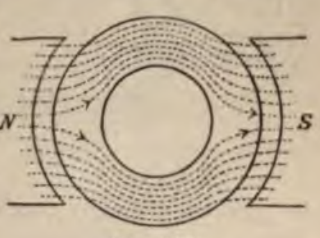


Fig. 101.

Da der durch die Ankerspulen fliessende Strom in seiner Stärke schwankt[1]), so werden in dem Eisen Wirbelströme induziert (siehe diese). Um deren Entstehung tunlichst zu verhindern, verwendet man nicht einen massiven, sondern einen aus elektrisch gegeneinander isolierten Drähten oder Blechen aus weichem Eisen zusammengesetzten Kern.

2. **Der Trommelanker (Trommelinduktor).** Von Hefner-Alteneck fand im Jahre 1872 eine andere Wickelungsart, durch die ein zweites System der Dynamomaschinen charakterisiert ist. Als Anker findet eine eiserne Trommel Verwendung, auf der die Drähte parallel zur Achse befestigt (in Nuten gelegt) werden. Wie beim Gramme-Pacinottischen Ringe werden die einzelnen Abteilungen durch Drähte mit einem vielteiligen Kommutator verbunden.

Wir denken uns zunächst auf der Oberfläche eines Cylinders zwei Drähte befestigt, die parallel zur Achse laufen und in demselben Achsenschnitte liegen (s. Fig. 102). Die vordern Drahtenden 1 und 2 sind mit den beiden Teilen *a*

1) Wenn eine Bürste zwei Lamellen gleichzeitig berührt, so wird die zwischen diesen Lamellen liegende Ankerspule kurz geschlossen. Dieser Kurzschluss hat Strompulsationen zur Folge, ferner ist er die Veranlassung zur Funkenbildung (Selbstinduktion in der betr. Spule).

und *b* des Kommutators, die anderen Enden 1′ und 2′ miteinander verbunden. Rotiert der Trommelanker in einem magnetischen Felde, so werden die beiden Drähte von Kraftlinien geschnitten. Da die Bewegungsrichtungen der beiden Drähte stets entgegengesetzte sind — bewegt sich z. B. der eine nach oben, so geht der andere nach unten —, so haben die in ihnen induzierten elektromotorischen Kräfte immer verschiedene Vorzeichen. Trotzdem addieren sie sich, wie die elektromotorischen Kräfte bei zwei hintereinander geschalteten Elementen. Haben die Bürsten *c* und *d* [1]) eine solche Lage, dass sie von einem Kommutatorteile auf den anderen übergehen, wenn die Ebene des Drahtrechtecks senkrecht auf den Kraftlinien steht, so fliesst durch eine an die Bürsten angeschlossene äussere Leitung der elektrische Strom stets in derselben Richtung.

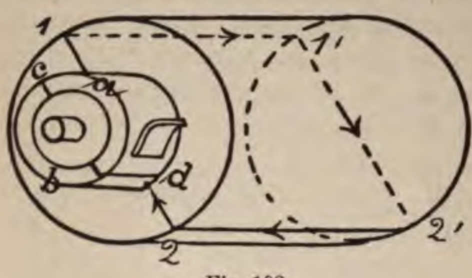


Fig. 102.

In der schematischen Figur 103 besteht die Wickelung aus zwei Windungen, die übereinander liegen; die Enden sind mit dem zweiteiligen Kommutator *K* verbunden; das zweipolige Magnetsystem wird durch die kleinen, zu hufeisenförmigen Magneten gehörenden Pole *N* und *S* dargestellt.

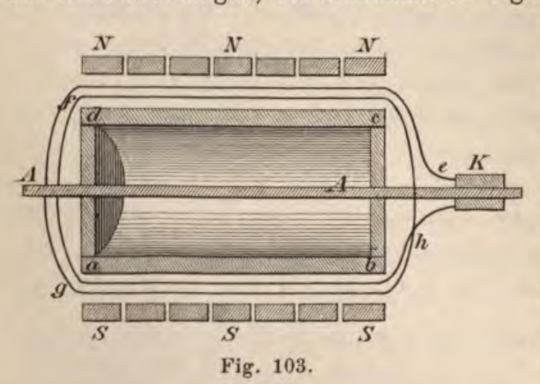


Fig. 103.

1) In der Figur ist nur eine Bürste sichtbar.

Diese Anordnung entspricht vier hintereinander geschalteten Elementen. Die an der Kommutator- und der dieser gegenüberliegenden Seite liegenden Drahtstücke dienen nur dazu, die wirksamen Teile der Wickelung in Serie zu schalten.

Der induzierte Strom schwankt in seiner Stärke periodisch. Dadurch, dass man die Anzahl der Spulen vergrössert und einen vielteiligen Kommutator verwendet, werden die Schwankungen vermindert.

Einen Trommelanker mit vierteiligem Kommutator und vier Rechtecken zeigt Figur 104. Die Drähte stehen senkrecht zur Papierebene (unterhalb derselben); ihre sichtbaren Enden sind mit 1 bis 8 bezeichnet. Auf der Rückseite der Trommel sind die Drähte 1 und 2, 3 und 4, 5 und 6, 7 und 8 miteinander verbunden. Die Hintereinanderschaltung der einzelnen Rechtecke (|‾|) wird hergestellt durch die vier Drähte an der Vorderseite. Diese sind mit den gegeneinander isolierten Segmenten des Kommutators verbunden, auf dem die Bürsten b_1, b_2 schleifen. Werden in den Drähten 7, 4, 5, 2 Ströme induziert, die nach dem Beschauer hin fliessen, so fliessen die Ströme in den Drähten 6, 1, 8, 3 von dem Beschauer weg (nach unten). Den nach b_1 fliessenden Strom kann man sich aus zwei Strömen zusammengesetzt denken, von denen der eine aus dem Drahte 4, der andere aus dem Drahte 5 kommt. Nennt man die nicht sichtbaren Enden der auf der Cylinderfläche liegenden Drähte 1′, 2′ etc. bis 8′, so ist der Verlauf des ersten Stromes folgender:

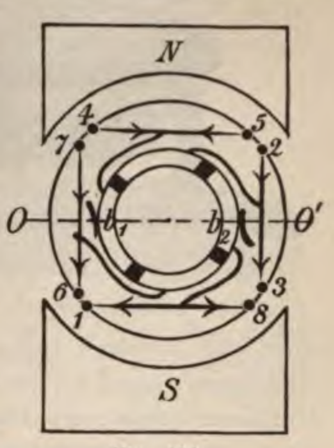


Fig. 104.

1 1′, 1′2′ (Verbindungsdraht auf der Rückseite), 2′2, 2 3, 3 3′, 3′4′ 4′4, durch den Verbindungsdraht zum Kommutator, nach b_1, durch den äusseren Stromkreis, nach b_2, nach 1 zurück.

Der zweite Strom nimmt folgenden Weg:

8 8', 8' 7', 7' 7, 7 6, 6 6', 6' 5', 5' 5, durch den Verbindungsdraht nach dem Kommutator, nach b_1, durch den äusseren Stromkreis, nach b_2, nach 8 zurück.

Ein Modell eines Trommelankers mit acht Spulen, jede aus zwei Windungen bestehend, und achtteiligem Kommutator zeigt die Fig. 105. Die Polschuhe hat man sich oben und

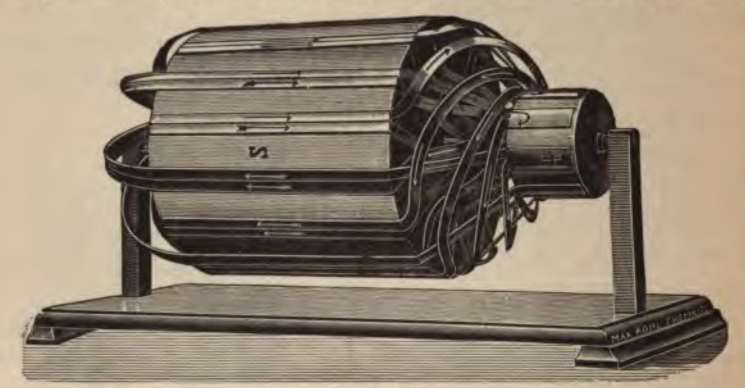


Fig. 105.

unten, die Trommel umfassend zu denken. Anfang und Ende der einzelnen Spulen sind durch einen umgebogenen Draht mit dem Kommutator verbunden; es schliesst sich also das Ende einer Spule an den Anfang einer benachbarten an.

3. **Mehrpolige Maschinen.** Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf Maschinen mit zwei Polen. Bei Maschinen für grössere Leistungen vermehrt man indessen die Anzahl der Pole und baut vierpolige, sechspolige etc. Maschinen. Die Pole werden in einem Kreise so angeordnet, dass die Polschuhe gleiche Abstände haben und Nord- und Südpole abwechseln. Wenn ein Ringanker für eine vierpolige Maschine benutzt wird, so sind vier Bürsten bezw. Bürstenreihen erforderlich, die in gleichen Abständen rund um den Kommutator herum angebracht werden müssen. Da die erste und dritte Bürste gleiches Potential haben, so können sie miteinander verbunden werden, ebenso die zweite und vierte Bürste (Parallelschaltung). Die Ankerwickelung zerfällt dann

in vier Abteilungen, die elektromotorische Kraft der Maschine ist gleich derjenigen einer Abteilung. Soll die vierpolige Maschine nur mit zwei Bürsten ausgerüstet werden, so wird die Parallelschaltung schon im Anker vorgenommen, indem je zwei sich diametral gegenüberliegende Spulen durch einen (halbkreisförmigen) Draht miteinander verbunden werden (Mordey-Schaltung). Die beiden Bürsten erhalten jetzt einen Abstand von 90°. Bei Maschinen mit 6, 8 etc. Polen kann man natürlich wie bei der vierpoligen die Parallelschaltung entweder bei den Bürsten oder im Anker herstellen; im letzteren Falle sind Ankerspulen, in denen gleich grosse und gleich gerichtete Spannungen induziert werden, miteinander zu verbinden. Der Bürstenabstand beträgt bei einer sechspoligen Maschine 60° oder 180°.

Auch bei der mehrpoligen Wickelung mit Serienschaltung kann die Zahl der Bürsten auf zwei reduziert werden.

Man sieht oft Maschinen, bei denen die Bürsten nicht zwischen den Polen, sondern diesen gegenüber liegen. Zu bemerken ist hier, dass die Lage der Bürsten von der Art abhängig ist, wie man die Ankerdrähte mit den Lamellen des Kommutators verbindet. Denken wir uns z. B. in Figur 99 (S. 164) die Verbindungsdrähte etwas länger gewählt als nötig ist, so dass wir den Kommutator etwas drehen können. Offenbar müssen die Bürsten, wenn der Kommutator (allein) gedreht wird, um den Drehungswinkel verschoben werden. Bei Ringankern würde diese Verzerrung zwecklos, ja sogar unpraktisch sein; bei den Trommelankern jedoch können die Ankerdrähte mit den Lamellen, ohne dass die Herstellung komplizierter wird, so verbunden werden, dass die Bürsten den Mitten der Polschuhe gegenüber liegen (siehe auch Ankerrückwirkung). Verbindet man z. B. in Figur 104 den Draht 4, 5 mit dem oberen Teile des Kommutators, den Draht 2, 3 mit dem rechten etc., so muss man die Bürsten um 90° verschieben.

4. Das dynamoelektrische Prinzip. Die in einer Dynamomaschine induzierte elektromotorische Kraft ist unter sonst gleichen Umständen um so grösser, je stärker die Feldmagnete sind. Man ging daher nach der Erfindung der elektrischen Maschinen bald dazu über, statt permanenter Magnete Elektromagnete zu verwenden. Diese wurden aus einer besonderen Stromquelle gespeist — Fremderregung.

W. Siemens war der Erste, der den in der Maschine selbst erzeugten Strom für die Erregung der Feldmagnete benutzte; er fand das sogenannte dynamoelektrische Prinzip (im Jahre 1867). Es sei in der schematischen Figur 106 *G* der Anker (ein Grammescher Ring) einer Dynamo, *F* und *F'* seien die Bürsten. Ehe der Strom in die äussere Leitung *K K'* gelangt, durchfliesst er die Wickelung eines Elektromagnets. Da Eisen, das einmal magnetisiert ist, einen Teil seines Magnetismus zurückbehält, so dürfen wir annehmen, dass eine geringe Anzahl von Kraftlinien vorhanden ist, wenn die Maschine (auch nach längerer Ruhepause) in Betrieb gesetzt wird.

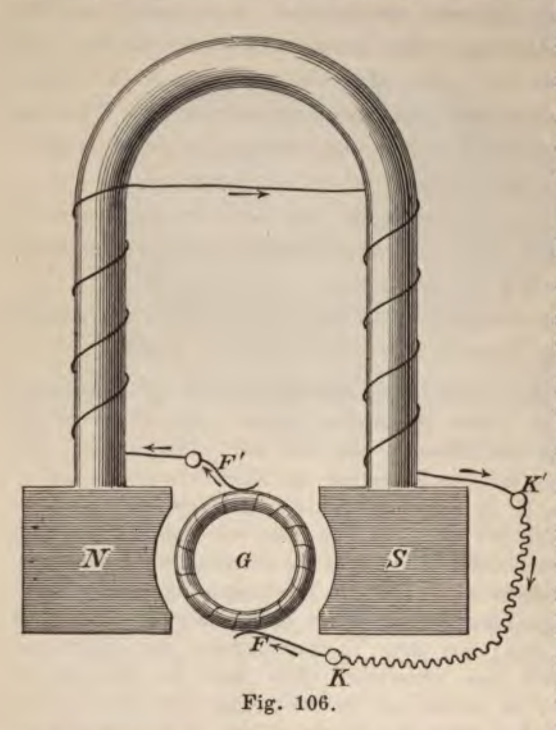


Fig. 106.

Es wird also zunächst, wenn der Anker anfängt sich zu drehen und der äussere Stromkreis geschlossen ist, ein Strom von geringer Intensität erzeugt. Durch diesen wird der Magnetismus des Elektromagnets etwas verstärkt. Da die Ankerdrähte jetzt eine grössere Anzahl von Kraftlinien schneiden, so wird der Strom stärker. So steigern sich Strom und Magnetismus gegenseitig, und zwar kann diese Steigerung so lange fortdauern, bis der Elektromagnet gesättigt ist.

Mit Rücksicht auf die Schaltung der Erregerspulen werden die Gleichstrommaschinen eingeteilt in

5. Hauptstrom-, Nebenschluss- und Compoundmaschinen. Dynamos, bei denen der ganze Ankerstrom, wie eben angenommen wurde, für die Erregung der Feldmagnete benutzt wird, nennt man Hauptstrommaschinen, auch Hauptschluss- oder Serienmaschinen. Anker, Magnetbewickelung und äusserer Stromkreis sind also bei diesen Maschinen hintereinander (in Serie) geschaltet (s. Fig. 106). Da der Erregerstrom eine grosse Stärke hat, so genügt es, eine Magnetbewickelung zu benutzen, die aus einer verhältnismässig geringen Anzahl von Windungen (eines dicken Drahtes) besteht.

Die Nebenschlussmaschine erhält man, wenn man nur einen Teil des im Anker erzeugten Stromes als Erregerstrom benutzt. Das Schema zeigt uns Figur 107. Der Ankerstrom teilt sich bei c; ein Teil, den wir i_1 nennen wollen, fliesst in der Richtung des kleinen Pfeiles durch die zahlreichen Windungen aus dünnem Drahte des Elektromagnetschenkels, von dort gelangt er in den Regulierwiderstand R, geht durch die rechtsseitigen Windungen des Erregerkreises und fliesst endlich durch die Bürste b_2 zum Anker zurück. Der Hauptstrom i_2 durchfliesst die Nutzleitung N; diese und der Erregerkreis sind also parallel geschaltet (der Erregerkreis bildet einen Nebenschluss).

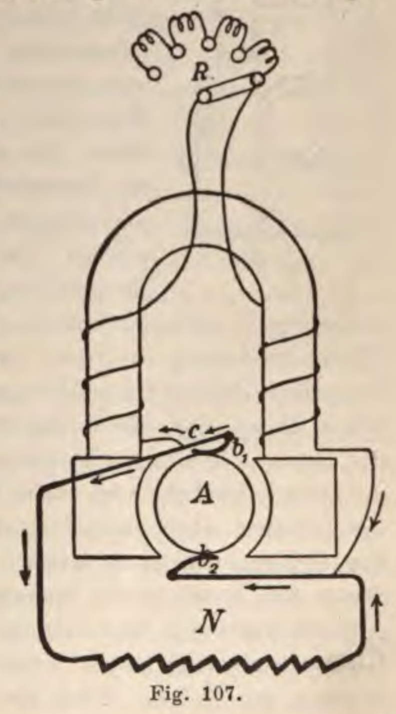


Fig. 107.

Verringert man bei einer bestimmten Klemmenspannung (Potentialdifferenz der Klemmen bezw. Bürsten) den Widerstand im Nebenschlusse dadurch, dass man einen Teil des

Regulierwiderstandes ausschaltet, so wächst der Erregerstrom i_1, und es wird, falls die Feldmagnete nicht schon vorher (d. h. durch den früheren Strom i_1) bis zur Sättigungsgrenze magnetisiert waren, das Feld verstärkt. Dies hat, wenn die Maschine mit konstanter Tourenzahl läuft, zur Folge, dass die elektromotorische Kraft wächst. Da man mit Hülfe des Rheostates R die Spannung regulieren kann, so nennt man ihn Regulator.

Bei den Verbund- oder Compoundmaschinen, auch Maschinen mit gemischter Schaltung genannt (s. Fig. 108), hat der Feldmagnet eine doppelte Wickelung: die eine besteht aus einer verhältnismässig geringen Anzahl von Windungen eines dicken Drahtes; sie ist mit dem äusseren Stromkreise in Serie geschaltet, wird also vom Hauptstrome durchflossen. Die zweite Wickelung wird aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes gebildet und liegt im Nebenschluss. Sind die beiden Bewickelungen richtig gegeneinander abgeglichen (durch richtige Wahl der Windungszahlen und, soweit die Nebenschlusswickelung in Betracht kommt, des Widerstandes), so hat die Klemmenspannung bei den verschiedensten Belastungen und konstanter Umdrehungszahl ungefähr gleiche Grösse. Nehmen wir z. B. an, dass die Stromstärke infolge einer Verringerung des äusseren Widerstandes steigt; es wird dann natürlich auch die Hauptwickelung von einem stärkeren Strome durchflossen; das bedeutet aber eine Vergrösserung der Feldstärke bezw. der elektromotorischen Kraft. Anderseits hat der stärkere Strom eine Zunahme des Spannungsabfalles im Anker (s. auch Ankerrückwirkung) und diese wiederum eine Verringerung der Klemmenspannung sowie eine Abnahme des Nebenschlussstromes zur Folge. Wird die Vergrösserung der Amperewindungen der Hauptwickelung durch die Verringerung der Amperewindungen des Nebenschlusses und durch die Zunahme des Spannungsabfalles kompensiert, so bleibt die Klemmen-

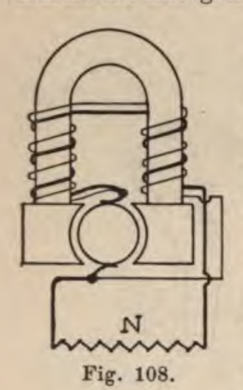


Fig. 108.

spannung innerhalb weiter Grenzen (nahezu) konstant. Die Compoundierung wird also lediglich durch den Hauptstrom bewirkt. Durch Vergrösserung der Anzahl der Hauptwindungen kann man es erreichen, dass die Klemmenspannung wächst, wenn die Belastung zunimmt; die Maschine ist dann übercompoundiert.

Der kurzen Charakterisierung der drei Maschinenarten sollen noch einige Bemerkungen über ihre Verwendung folgen. Wir wollen annehmen, dass eine Hauptstrommaschine einen Strom von J Amp. in den äusseren Stromkreis sendet. Wächst jetzt der äussere Widerstand, so wird der Strom aus zwei Gründen kleiner als J, zunächst nämlich, weil der vergrösserte Widerstand, auch wenn die elektromotorische Kraft unverändert bliebe, eine Abnahme der Stromstärke zur Folge hat; die elektromotorische Kraft bleibt aber — und das ist der zweite Grund — nicht auf der früheren Höhe, weil mit der Stromstärke das magnetische Feld abnimmt. In elektrischen Anlagen, bei denen der äussere Widerstand innerhalb weiter Grenzen schwankt, werden Hauptstrommaschinen kaum gebraucht, zumal sie sich auch nicht für die Ladung von Akkumulatoren eignen (s. diese); man findet sie bei sogenannten Hauptstromkraftübertragungen, ferner wenn eine grössere Reihe von Bogenlampen in Hintereinanderschaltung brennen soll.

Nebenschlussmaschinen haben den grossen Vorzug, dass die Spannungsregulierung innerhalb weiter Grenzen erfolgen kann. Wird ferner der Strom in der Nutzleitung unterbrochen, so wird die Maschine nicht stromlos, denn die Elektromagnetwickelung bildet noch eine die beiden Klemmen verbindende Leitung. Die Maschine bleibt also unter Spannung und kann, wenn in der Nutzleitung der Strom wieder geschlossen wird, sofort mit voller Kraft einsetzen. Ein anderer Vorzug der Nebenschlussmaschine besteht darin, dass sie bei plötzlich eintretendem Kurzschlusse fast stromlos wird. Die Klemmenspannung sinkt dann nämlich stark (Spannungsverlust im Anker und Rückwirkung. Nun ist aber der durch den Erregerkreis fliessende Strom i_1 gleich der Klemmenspannung e, dividiert

durch den Widerstand in der Elektromagnetwickelung; wenn also e kleiner wird, so nimmt i_1 ab, d. h. das magnetische Feld wird geschwächt. Endlich ist zu erwähnen, dass man Nebenschlussmaschinen leicht parallel schalten kann, und dass sie für die Ladung von Akkumulatoren geeignet sind. Wegen der genannten Vorzüge findet die Nebenschlussmaschine in elektrischen Anlagen ausgedehnte Verwendung.

Wie wir gesehen haben, arbeiten Compoundmaschinen bei den verschiedensten Belastungen mit nahezu konstanter Klemmenspannung. Sie sind daher in Anlagen mit stark schwankendem Konsum am Platze, bei denen Akkumulatoren [1]) keine Verwendung finden (reine Kraftverteilungsanlagen, Strassenbahnzentralen).

6. **Ankerrückwirkung oder Ankerreaktion.** Wenn man die Bürsten einer Dynamo in die neutrale Zone bringt und dem Anker Strom entnimmt, so beobachtet man, dass sich zwischen den Bürsten und dem Kommutator Funken bilden. Die Funkenbildung wird um so stärker, je mehr man den Ankerstrom vergrössert. Ferner findet man, dass die Klemmenspannung der Maschine stark zurückgeht. Um die Funkenbildung zu verringern, muss man die Bürsten aus der neutralen Zone im Sinne der Drehung des Ankers verschieben. Der Hauptgrund für die genannten Erscheinungen liegt in der Rückwirkung des Ankerstromes auf das magnetische Feld. Diesem Strome entspricht nämlich ebenfalls ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien aber einen anderen Verlauf haben wie die Kraftlinien, die von den Polen der Feldmagnete ausgehen und in den Ankerkern eintreten. Wie man sich nun zwei Kräfte durch eine Kraft ersetzt denken kann, so kann man sich die beiden magnetischen Felder durch ein Feld ersetzt denken. Die Kraftlinien des resultierenden Feldes bilden mit der Achse der Feldmagnete einen gewissen Winkel. Die in Fig. 96 (s. S. 162) mit i und i_1 bezeichneten Stellen sind jetzt nicht mehr diejenigen, denen die grösste

1) Diese wirken, wenn Nebenschlussmaschinen benutzt werden, ausgleichend.

Kraftliniendichte entspricht; sie liegen nicht mehr in der neutralen Zone, man muss also eine Bürstenverschiebung vornehmen.

Besonders stark ist die Ankerrückwirkung, wenn man einer Dynamo, die so erregt ist, dass ihre Spannung weit unter der normalen liegt, Strom entnimmt. Man beobachtet dann einen starken Abfall der Klemmenspannung.

7. Leistung der Gleichstrommaschinen und Wirkungsgrad. Unter der Leistung einer Dynamo ist die an den äusseren Stromkreis abgegebene zu verstehen. Sie ist also bestimmt durch das Produkt aus der Klemmenspannung und der Stärke des durch das Hauptkabel fliessenden Stromes. Die Leistung wird in Kilowatt angegeben.

Angenommen, eine Dynamo gebe längere Zeit einen konstanten Strom ab. Die Ankerdrähte, der Kommutator und die Verbindungsdrähte erwärmen sich dann, und die Temperatur steigt so lange, bis sich ein stationärer Zustand ausgebildet hat. Welche Höhe die Endtemperatur hat, hängt natürlich von der Stromstärke ab. Erreicht die Temperatur einen zu grossen Betrag, so kann die Isolation der Drähte Schaden leiden; es können sich Nebenschlüsse oder Kurzschlüsse in der Maschine bilden. Berücksichtigen wir noch, dass im allgemeinen bei elektrischen Anlagen die Dynamos mit (angenähert) konstanter Spannung arbeiten, so folgt, dass eine elektrische Maschine dauernd nur eine bestimmte Leistung abgeben darf; diese nennt man die *normale Leistung*. Sie wird auf einem Schild, dem Leistungsschild, angegeben, das auf dem Gehäuse der Maschine angebracht ist.

Wenn eine Dynamo ihre normale Leistung beliebig lange abgibt (Dauerbetrieb), so dürfen die Temperaturen der Drähte gewisse Grenzen nicht überschreiten, deren Höhe sich nach der Beschaffenheit des Isolationsmaterials richtet. (Näheres siehe „Normalien zur Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren".)

Die Umwandlung von mechanischer Arbeit in elektrische Energie, wie sie in den Dynamomaschinen erfolgt (s. S. 97), ist notwendig mit *Verlusten* verknüpft. Diese bestehen aus der Arbeit, die zur Überwindung der Reibung (in den

Lagern, zwischen dem rotierenden Anker und der Luft, sowie zwischen den Bürsten und dem Kommutator) verbraucht wird, der im Anker und der Magnetbewickelung in Stromwärme umgewandelten Energie und den sogenannten Eisenverlusten (Wirbelströme und Hysteresis, S. 28 u. 118). Zieht man alle die genannten Verluste, auf die Sekunde bezogen, von der zugeführten, d. h. von der Antriebsmaschine auf die Dynamo übertragenen Leistung (sekundlichen Arbeit) ab, so erhält man den nutzbaren Effekt, d. h. denjenigen elektrischen Effekt, über den man ausserhalb der Maschine nach Belieben verfügen kann.

Man nennt das Verhältnis der abgegebenen (nutzbaren) zur zugeführten Leistung den Wirkungsgrad.

Die zugeführte Leistung, die gewöhnlich in Pferdekräften angegeben wird, ist, wenn Betriebsmaschine und Dynamo zusammengebaut sind (Dampfdynamo), gleich der effektiven Leistung der Betriebsmaschine; bei Riemenantrieb ist der Verlust in der Transmission abzuziehen.

Es sei die auf die Dynamo übertragene Leistung gleich 50 PS, die Klemmenspannung betrage 110 Volt, die Stromstärke 300 Amp.; dann ist, da 1 PS = 736 Watt,

$$\text{der Wirkungsgrad} = \frac{110 \, . \, 300}{50 \, . \, 736} = 0{,}9.$$

Wir erhalten also statt 1 Watt, das der Maschine zugeführt wird, 0,9 Watt, oder statt 100 Watt aufgewendeter Arbeit 90 Watt im äusseren Stromkreise, d. h. der Wirkungskreis beträgt 90 %.

Der Wirkungsgrad kann bei grossen, normal belasteten Dynamos eine Höhe von 90—93 % erreichen, während er für kleine Maschinen von 1 bis zu 10 PS zwischen 70 und 80 % liegt.

Über die Bestimmung des Wirkungsgrades geben die „Normalien“ Aufschluss.

II. Wechselstrommaschinen.

1. Einteilung der Wechselstrommaschinen. Ein einfacher Fall einer Wechselstrommaschine wurde bereits in Kapitel 10 besprochen. Statt zwei getrennte Spulen zu verwenden, kann man wie beim Grammeschen Ringe eine fortlaufende, in sich geschlossene Wickelung herstellen und zwei gegenüberliegende Punkte mit den Schleifringen verbinden,

auf denen Bürsten liegen. Ist ausser den Schleifringen noch ein Kommutator vorhanden, der in der früher beschriebenen Weise mit den Ankerdrähten verbunden ist, so kann man der Maschine gleichzeitig Gleich- und Wechselstrom entnehmen. Wie bei Gleichstrommaschinen können die Drähte, in denen die Ströme induziert werden, statt auf einem Ringe auf einer Trommel untergebracht werden.

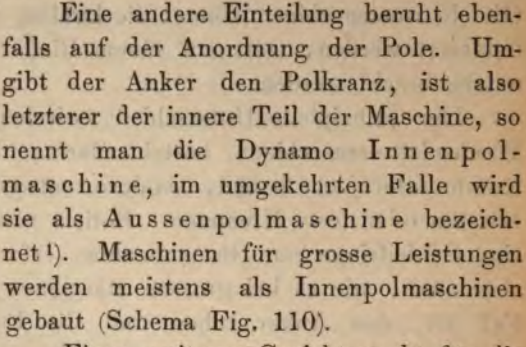
Der prinzipielle Unterschied zwischen Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen besteht darin, dass letztere einen Kommutator nicht haben, sondern entweder Schleifringe mit Bürsten oder feste Klemmen. Rotiert nämlich der Anker, so sind Schleifringe zur Stromabnahme erforderlich; man kann aber auch, wie es bei grossen Maschinen wohl meistens der Fall ist, den Anker ruhen und die Feldmagnete rotieren lassen. Es ist dann eine besondere Vorrichtung zur Abnahme der induzierten Ströme nicht erforderlich; die Enden der Ankerwickelung sind an Klemmen befestigt, mit denen die äussere Leitung verbunden wird. Es ergibt sich somit eine andere Einteilung der Wechselstrommaschinen, nämlich in solche mit rotierendem Anker und in solche mit rotierendem Magnetsystem. Die letztere Art wird, besonders wenn es sich um die Erzeugung von Strömen hoher Spannung handelt, bevorzugt. Es sei jedoch bemerkt, dass man aus technischen Gründen höhere Spannungen als 7000—8000 Volt in Wechselstrommaschinen selten erzeugt, und es vorzieht, eine ev. nötige Spannungserhöhung in den betriebssicheren Transformatoren vorzunehmen.

Ferner unterscheidet man zwischen Wechselpol- und Gleichpolmaschinen. Bei den ersteren ist ein Polkranz vorhanden, und nebeneinanderstehende Pole haben entgegengesetzte Polarität, so dass die Kraftlinien abwechselnd in der einen und in der anderen Richtung den Anker durchsetzen. Bei den Gleichpolmaschinen sind zwei Polkränze vorhanden, die sich gegenüberstehen. In dem Zwischenraume zwischen den Polschuhen befindet sich die auf einem scheibenförmigen Anker befestigte Wickelung (s. Fig. 109 a. d. f. S., in der A die Drehungsachse, W die Wickelung ist). Alle Pole auf der

einen Seite des Ankers sind Nordpole und alle Pole auf der anderen Seite Südpole, so dass alle wirksamen Kraftlinien in derselben Richtung den Anker durchsetzen.



Fig. 109.



Eine andere Einteilung beruht ebenfalls auf der Anordnung der Pole. Umgibt der Anker den Polkranz, ist also letzterer der innere Teil der Maschine, so nennt man die Dynamo Innenpolmaschine, im umgekehrten Falle wird sie als Aussenpolmaschine bezeichnet[1]). Maschinen für grosse Leistungen werden meistens als Innenpolmaschinen gebaut (Schema Fig. 110).

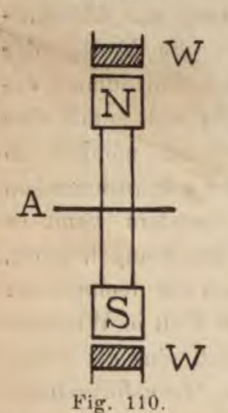


Fig. 110.

Einen weiteren Gesichtspunkt für die Benennung bildet die geometrische Form der Ankeroberfläche. Man unterscheidet glatte Anker, Loch- oder Nutenanker und Zackenanker, je nachdem die Drähte auf der glatten Oberfläche des Ankers befestigt, oder in runde bezw. eckige Kanäle des Ankers gelegt, oder um vorspringende cylindrische Ansätze (Zacken) gewickelt werden. Am meisten werden Loch- oder Nutenanker benutzt.

Endlich stützt sich eine Einteilung der Wechselstromgeneratoren auf die Anzahl der Stromkreise, in welche die Ankerwickelung geteilt ist. Diese Unterscheidung ist schon früher besprochen worden (Einphasen-, Zweiphasen-, Drehstrommaschinen).

Ein näheres Eingehen auf die verschiedenen Konstruktionen würde weit über den Rahmen dieses Buches hinausgehen. Es sollen nur noch einige Bemerkungen über

2. **Drehstrommaschinen** Platz finden. In Fig. 111 ist ein Schnitt durch eine achtpolige Maschine abgebildet, bei

1) Diese Einteilung gilt auch für Gleichstrommaschinen.

der der Magnetkranz *M* rotiert. Auf jeden Pol kommen drei Nuten im Anker *R*. Dieser ist aus Eisenblechscheiben zusammengesetzt, die durch Zwischenlagen aus Papier gegeneinander isoliert sind, um die Entstehung von Wirbelströmen möglichst zu verhindern. Nennen wir die Zeit, in der der Polkranz eine Umdrehung macht, τ, so ist die Periode gleich $\frac{\tau}{4}$; denn nach je $\frac{\tau}{4}$ Sekunden ist die in einem bestimmten Ankerdrahte induzierte elektromotorische Kraft, was Grösse und Vorzeichen anbelangt, die gleiche. Die Drähte werden in die Nuten gelegt; sie sind gegen das Ankereisen sorgfältig isoliert. Aus Fig. 112 kann man ersehen, wie die Windungen gelegt sind. Die Nuten sind mit den Ziffern 1, 2, 3 etc. bezeichnet. Nehmen wir an, dass in demjenigen Drahte, der in Nute 1 liegt (senkrecht zur Papierebene), ein Strom induziert wird, der von unten nach oben (also nach dem Beschauer hin) fliesst, so wird in dem in Nute 4 liegenden Drahte ein Strom induziert, der von dem Beschauer wegfliesst. Durch das an der vorderen Seite des Ankers befindliche Drahtstück *a* werden die beiden Ankerdrähte hintereinander geschaltet (Addition der elektromotorischen Kräfte). In dem Drahte, der in Nute 7 liegt, fliesst der Strom von unten nach oben, Draht 4 und Draht 7 sind auf der hinteren Seite durch ein gekrümmtes Drahtstück miteinander verbunden etc. Zu der ersten Phase gehören also die Drähte in den Nuten 1, 4, 7, 10 etc. Die in dem Drahte 2 induzierte elektromotorische Kraft ist gegen diejenige in 1 um $^1/_6$ Periode verschoben; sie ist gleich aber entgegengesetzt

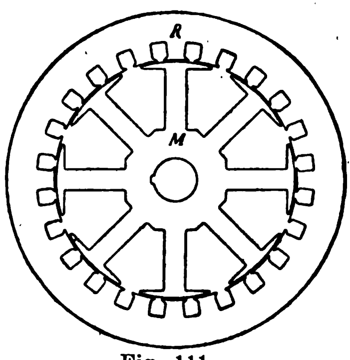


Fig. 111.

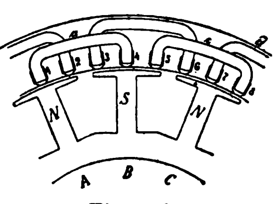


Fig. 112.

gerichtet derjenigen, die in dem in Nute 23 liegenden Drahte erzeugt wird; auf der Rückseite des Ankers sind die Drähte 2 und 5 miteinander verbunden. Die Drähte 2, 5, 8 etc. bilden also die zweite Phase.

Einer Umdrehung des Magnetrades entsprechen 4 Perioden; soll also die Periodenzahl 50 pro Sekunde betragen, so muss das Rad $\frac{60.50}{4} = 750$ Umdrehungen pro Minute machen.

3. **Die Erregung.** Die Erregerwickelung wird meistens in der Weise angeordnet, dass jeder Pol mit Windungen umgeben wird, seltener ist für alle Pole nur eine einzige Erregerspule vorhanden. Für die Bewickelung benutzt man entweder isolierten Draht, der von einem festen Spulenkasten aufgenommen wird, oder blankes Kupferband; man macht also in dem Produkte $n . J =$ Amperewindungen entweder n oder J gross. Es genügt im letzteren Falle eine geringe Isolation, weil zwischen benachbarten Windungen nur eine kleine Potentialdifferenz besteht.

Den in der Maschine selbst erzeugten Strom kann man nicht ohne weiteres für die Erregung der Feldmagnete verwenden, da diese ihre Polarität nicht ändern dürfen. Will man keine fremde Gleichstromquelle für die Erregung zu Hülfe nehmen, so muss man den in einer oder mehreren Ankerspulen erzeugten Wechselstrom mittels eines Kommutators in Gleichstrom umwandeln. Meistens benutzt man für die Erregung der Feldmagnete eine besondere kleine Gleichstromdynamo, die bei grösseren Typen auf der Welle der Wechselstrommaschine sitzt, event. in Verbindung mit Akkumulatoren.

Wenn sich das Magnetrad dreht, so werden Anfang und Ende der Magnetbewickelung mit zwei Schleifringen verbunden, denen mittels feststehender Bürsten der Gleichstrom zugeführt wird.

Die Regulierung der Spannung erfolgt dadurch, dass man den Erregerstrom verstärkt oder schwächt. Ist die Erregermaschine eine Hauptstrommaschine, so legt man einen Regulierwiderstand zwischen diese und die zu speisenden

Feldmagnete; verwendet man eine Nebenschlussmaschine, so verändert man mittels Nebenschlussregulators deren Spannung und schaltet noch zwecks feinerer Regulierung einen Rheostat in den Hauptstromkreis.

Zwölftes Kapitel.

Elektromotoren.

I. Gleichstrommotoren.

1. **Wirkungsweise.** Jede Dynamo kann sowohl für die Umwandlung mechanischer Leistung in elektrische als auch für den umgekehrten Vorgang Verwendung finden. Leitet man z. B. in eine Serienmaschine Gleichstrom, so werden die Feldmagnete erregt, und die Pole üben auf die stromdurchflossenen Ankerdrähte Kräfte aus (s. Seite 97), die so gerichtet sind, dass der Anker in eine rotierende Bewegung gerät. Durch die Drehung wird die Richtung der Kräfte nicht geändert, es treten nur andere Drähte an die Stelle der an den Polen vorbeigegangenen. Die Rotation dauert also so lange, als man Strom in die Maschine schickt. Die Summe der auf den Anker wirkenden tangentialen Kräfte ist proportional der Stärke des magnetischen Feldes und der Ankerstromstärke.

Die Gleichstrommotoren stimmen also in der Konstruktion vollständig mit den Gleichstrommaschinen überein.

Wenn man einen Leiter, durch den ein Strom bereits fliesst, so bewegt, dass er die Kraftlinien eines Magnets schneidet, so wird in ihm gerade so eine elektromotorische Kraft induziert, wie wenn er vor Beginn der Bewegung stromlos gewesen wäre. Da sich nun bei einem Elektromotor die Wickelung des rotierenden Ankers durch das Feld des Erregerkreises hindurch bewegt, so werden in den Anker-

drähten elektromotorische Kräfte ins Leben gerufen. Diese suchen einen Strom zu erzeugen, der dem eingeleiteten entgegengesetzt gerichtet ist. (Es folgt dies schon aus dem Satze von der Erhaltung der Energie; wäre es nämlich anders, so würde die Maschine elektrische Energie abgeben; wir hätten zwei hintereinander geschaltete Stromquellen vor uns). Man bezeichnet daher die in dem rotierenden Anker eines Elektromotors induzierte elektromotorische Kraft als Gegenspannung oder als elektromotorische Gegenkraft. Natürlich muss die Spannung der Stromquelle, die dem Elektromotor Strom liefert, grösser als die Gegenspannung sein. Nennen wir die Spannung an den Bürsten des Motors (die zugeführte Spannung) E_1, die Gegenspannung E_2, den Widerstand des Ankers w_a, so ist die Ankerstromstärke

$$J_a = \frac{E_1 - E_2}{w_a}.$$

Die Spannung $E_1 - E_2$ dient zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes. $E_2 . J_a$ ist die mechanische Leistung (in Watt), die der Anker abgeben würde, wenn die in ihm erzeugte Stromwärme der einzige Energieverlust wäre.

Die Grösse der Gegenspannung E_2 hängt von der Stärke des magnetischen Feldes und von der Tourenzahl ab; sie unterscheidet sich von der Bürstenspannung des Motors (der Netzspannung bei Nebenschlussmotoren) nur um den Betrag $w_a . J_a$. Da der Ankerwiderstand nur gering ist, so ist E_2 nur wenig von E_1 verschieden. Man kann daher sagen, dass der Gleichstromelektromotor eine solche Tourenzahl anzunehmen sucht, dass seine Gegenspannung der Spannung des zugeführten Stromes (gemessen an den Klemmen bezw. den Bürsten) nahezu gleich kommt. Ändert man also die Stärke des magnetischen Feldes, so ändert sich die Tourenzahl.

Die Ankerrückwirkung gibt bei den Elektromotoren ebenso wie bei den Generatoren zu einer Funkenbildung Veranlassung, die durch Bürstenrückschub beseitigt bezw. verringert wird.

2. **Hauptstrommotoren.** Diese verdienen besonderes Interesse insofern, als sie unter anderem bei elektrischen

Bahnen ausgedehnte Verwendung finden. Ein Hauptstrommotor möge an ein Netz von konstanter Spannung (oder an eine Akkumulatorenbatterie) angeschlossen sein, die Belastung aber, d. h. die sekundliche Arbeit, die man von ihm verlangt, ändere sich. Wächst die Belastung, so nimmt zunächst, wenigstens während einer sehr kurzen Zeit, die Tourenzahl ab; infolgedessen wird die Gegenspannung im Anker, E_2, kleiner und der Bruch $\frac{E_1 - E_2}{w_a}$ oder J_a grösser. Das Wachsen des Ankerstromes hat aber, da der durch die Magnetbewickelung fliessende Strom gleich ist J_a, eine Verstärkung des magnetischen Feldes zur Folge. Würde nun der Motor bei der grösseren Belastung wieder auf seine ursprüngliche Tourenzahl kommen, so würde die elektromotorische Gegenkraft im Anker grösser werden, als sie eben war. Der Motor würde also weniger Strom aufnehmen, d. h. er würde bei grösserer Leistung weniger Energie verbrauchen. Da die Annahme, dass die Tourenzahl bei wachsender Belastung konstant bleibt, zu einem Widerspruche führt, so ist sie als eine falsche zu verwerfen. Wir gelangen also durch einen indirekten Beweis zu dem Resultate, dass die Tourenzahl eines Serienmotors mit steigender Belastung (mit zunehmender Stromstärke) abnimmt.

Verringert sich die Belastung, so wird die Tourenzahl zunächst grösser, die Gegenspannung steigt, der Strom wird schwächer, ebenso das Feld, und der Motor läuft schneller. Bei Leerlauf (Abfallen des Riemens) nimmt der Serienmotor eine so grosse Tourenzahl an, dass er in Stücke fliegen kann — der Motor „geht durch“.

Wird der ruhende Motor mit dem Netze verbunden, wird er also eingeschaltet, so ist zunächst eine Gegenspannung nicht vorhanden. Da der Ohmsche Widerstand in der Magnetbewickelung und im Anker nur gering ist, so würde sich, wenn der Motor direkt an das Netz angeschlossen würde, ein ausserordentlich starker Strom in den Motor stürzen (Kurzschluss). Dies würde zur Folge haben, dass die Leitungsdrähte oder die Drähte im Motor sehr heiss oder gar glühend werden, die Isolation beschädigt wird, dass Sicherungen durchbrennen,

angeschlossene Lampen dunkel brennen etc. Um den Anlaufstrom abzuschwächen, muss vor den Motor ein Widerstand gelegt werden, der langsam verringert wird. Diesen veränderlichen Widerstand (Kurbelrheostat) nennt man Anlasser. Ist dieser so gross gewählt, dass der Anlaufstrom stärker ist als der normale Strom des Motors, so hat der Serienmotor eine grosse Anlaufskraft, ein grosses Anzugsmoment (Verwendung bei Aufzügen, Kranen, Strassenbahnen).

Die Tourenänderung kann nach verschiedenen Methoden vorgenommen werden, von denen folgende erwähnt seien. Wenn man die Klemmenspannung des Motors verringert, so läuft der Motor langsamer, erhöht man sie, so läuft er schneller. Schaltet man also zwischen den Motor und die Stromquelle einen Vorschaltwiderstand — als solchen kann man unter Umständen den Anlasser benutzen —, so kann man E_1 und daher auch die Tourenzahl leicht variieren. Diese Art der Tourenänderung ist mit grösseren Energieverlusten verbunden. Eine andere Art der Geschwindigkeitsregulierung, die grössere Verbreitung gefunden hat und die kurz die Spulenschaltung genannt wird, soll für einen vierpoligen Motor erklärt werden. Die Anfänge und Enden der vier Spulen, die mit s_1 bis s_4 bezeichnet werden sollen, mögen mit 8 Kontaktstücken in Verbindung stehen, so dass die Spulen leicht parallel oder hintereinander geschaltet werden können. Werden s_1 bis s_4 in Reihe geschaltet, so fliesst durch jede Spule der ganze Strom J [1]). Hat also jede Spule m Windungen, so ist die Amperewindungszahl (s. Seite 100) gleich 4 m J. Schaltet man s_1 bis s_4 parallel, so fliesst durch jede Spule der Strom $\frac{J}{4}$; die Amperewindungszahl ist also $4\,m\,.\,\frac{J}{4} = m\,.\,J$. Es mögen jetzt die Spulen paarweise parallel und die beiden so erhaltenen Gruppen in Reihe geschaltet werden (cf. Seite 67). Durch jede Windung fliesst jetzt der Strom $\frac{J}{2}$; da 4 m Windungen vorhanden sind, so ist die Amperewindungszahl $4\,m\,.\,\frac{J}{2} = 2\,m\,J$. Berücksichtigen wir, dass eine Vergrösserung der Amperewindungen eine

1) Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass bei den verschiedenen Schaltungen der in den Motor fliessende Strom konstant sei; wir vernachlässigen also die Widerstandsänderungen in der Magnetbewickelung.

Verstärkung des magnetischen Feldes und diese eine Verringerung der Tourenzahl zur Folge hat, so ergibt sich, dass die Geschwindigkeit des Ankers bei der ersten Schaltung am kleinsten und bei der zweiten am grössten ist.

3. **Nebenschlussmotoren.** Wegen seiner vorzüglichen Eigenschaften hat der Nebenschlussmotor die grösste Verbreitung unter den Gleichstrommotoren gefunden.

Ein Nebenschlussmotor sei an ein Netz, das die konstante Spannung E_1 Volt liefert, angeschlossen. Dann ist der durch die Elektromagnetbewickelung, deren Widerstand gleich w_1 Ohm sei, fliessende Strom $i_1 = \frac{E_1}{w_1}$ Amp. Liegt zwischen Netz und Motor kein beachtenswerter Widerstand[1]), so ist i_1 konstant (unabhängig von dem Ankerstrome), daher auch das magnetische Feld. Zunächst kann man sich leicht klar machen, dass die Tourenzahl bei Leerlauf nicht eine gefährliche Höhe annehmen kann, wie es beim Hauptstrommotor der Fall ist. Da nämlich das magnetische Feld (nahezu) unabhängig von der Belastung ist, so hängt die Gegenspannung nur von der Tourenzahl ab. Es möge nun bei 110 Volt Netzspannung die elektromotorische Gegenkraft des vollbelasteten Motors 100 Volt[2]) betragen, die zugehörige Tourenzahl sei 1000. 1 Volt Gegenspannung kommt also, auch bei Leerlauf, auf eine Tourenzahl von $\frac{1000}{100} = 10$. Der ganzen Betriebsspannung entsprechen also $110 \,.\, 10 = 1100$ Touren. Diese Tourenzahl kann aber nicht ganz erreicht werden, da bei 110 Volt Gegenspannung der Motor keinen Strom aufnehmen würde.

Das nähere Verhalten bei Belastungsschwankungen erkennt man ohne weiteres aus folgenden Zahlenangaben. Bei einem Nebenschlussmotor für 120 Volt war nach Messungen die Ankerstromstärke bei Vollbelastung 60 Amp., der Anker-

1) Es kommt hier auf das Produkt Stromstärke mal Widerstand an (Spannungsverlust).

2) In Wirklichkeit wird sie bei grösseren und mittelgrossen Motoren etwas höher sein.

widerstand betrug 0,075 Ohm. Mithin war die Gegenspannung 120 — 60 . 0,075 = 115,5 Volt (dies folgt aus der Gleichung $J_a = \frac{E_1 - E_2}{w_a}$).

Bei Leerlauf verbrauchte der Motor 6 Amp.; seine Gegenspannung betrug also in diesem Falle 119,6 Volt, d. h. noch nicht 4 % mehr als bei Vollbelastung. Da nun die Gegenspannung wegen der Konstanz des magnetischen Feldes der Tourenzahl proportional ist, so betrug die Änderung der Geschwindigkeit innerhalb der Grenzen Leerlauf und Vollbelastung noch nicht 4 %.

Wenn sich auch die Tourenzahl mit der Belastung so wenig ändert, dass diese Änderung im praktischen Betriebe keine Rolle spielt, so ist sie doch für die Ankerstromstärke maßgebend. Der Elektromotor nimmt also ohne irgend welche mechanische oder elektrische Regulierungsvorrichtung eine seiner jeweiligen Leistung entsprechende Energiemenge (Stromstärke mal Klemmenspannung) aus der Leitung. Es ist dies übrigens eine Eigentümlichkeit, die allen Arten von Elektromotoren gemeinsam ist.

Anlasswiderstand. Da im Momente des Einschaltens ein ausserordentlich starker Strom in den Anker fliessen würde, weil noch keine Gegenspannung vorhanden ist, so muss man sich eines Anlassers bedienen. Würde man einen einfachen Kurbelrheostat in die Zuleitung legen und diesen beim Anlassen allmählich ausschalten, so würde man nicht nur den Ankerstrom, sondern auch die Klemmenspannung und daher auch i_1 bezw. das magnetische Feld schwächen. Der Motor würde also beim Einschalten nur eine geringe Kraft (ein geringes Anzugsmoment) entwickeln, die ja der Feldstärke und der Ankerstromstärke proportional ist. Die Anlasswiderstände für Nebenschlussmotoren müssen daher so eingerichtet sein, dass beim Einschalten nur der Ankerstrom, nicht aber zugleich der Erregerstrom geschwächt wird. Wie dies erreicht werden kann, ist aus der schematischen Figur 113 zu ersehen. Berührt die Kurbel H das erste Kontaktstück K_1, so fliesst der Strom aus der positiven Leitung L_1 nach K_1,

dort teilt er sich; der Erregerstrom geht durch die Elektromagnetbewickelung N und gelangt über P_2 in die negative Leitung L_2; der Ankerstrom muss zuerst den ganzen zwischen K_1 und K_2 liegenden Widerstand durchfliessen. Dreht man die Kurbel nach K_2 hin, so muss der Nebenstrom durch die zwischen K_1 und der Kurbel liegenden Stufen des Nebenschlusses gehen. Dadurch wird er zwar etwas geschwächt, jedoch ist diese Schwächung, wie man leicht nachweisen kann, so gering, dass sie für die Praxis ohne Belang ist.

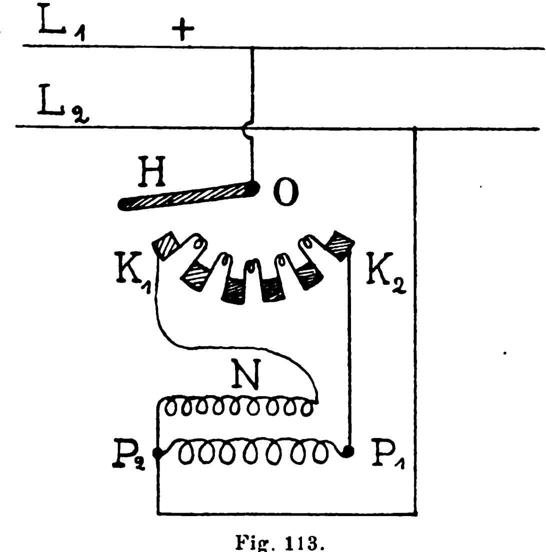


Fig. 113.

Tourenregulierung. Das einfachste Mittel, die Tourenzahl zu ändern, besteht darin, dass man das magnetische Feld verstärkt oder schwächt. Zu dem Zwecke schaltet man in den Erregerstromkreis zwischen Anlasser und Elektromotor (in Fig. 113 also zwischen K_1 und N) noch einen veränderlichen grösseren Widerstand (Nebenschlussregulator).

Umsteuerung. In manchen Fällen ist es notwendig, den Drehungssinn des Ankers nach Belieben zu ändern, den Elektromotor umzusteuern (Aufzüge, Krane). Allgemein ändert sich die Drehrichtung eines Elektromotors, wenn man entweder den Magnetstrom oder den Ankerstrom umkehrt. Natürlich darf die Umkehrung erst dann erfolgen, wenn der Elektromotor zum Stillstand gekommen ist. Um nun eine vorzeitige Umkehrung des Stromes zu verhindern, werden Anlasser und Umkehrvorrichtung zwangläufig miteinander verbunden — Umkehr-Anlasser.

4. Compoundmotoren. Im allgemeinen vereinigt der Motor mit gemischter Schaltung die Eigenschaften des Haupt-

strom- und Nebenschlussmotors in sich, allerdings in abgeschwächtem Maße. Das Anzugsmoment ist grösser als beim Nebenschlussmotor. Vergegenwärtigt man sich, wie sich die beiden vorher behandelten Motoren bei Belastungsschwankungen verhalten, so findet man, dass der Compoundmotor konstante Tourenzahl nicht einhalten kann. Die Tourenschwankungen liegen meistens innerhalb der Grenzen 10—20 %. Bei Leerlauf verhält sich der Compoundmotor gerade so wie ein Nebenschlussmotor, er kann also nicht „durchgehen".

II. Wechselstrommotoren.

1. **Synchrone Motoren.** Die Wirkungsweise dieser Motoren erkennt man, wenn man ausgeht von dem Zusammenarbeiten zweier Wechselstromgeneratoren auf denselben Stromkreis. Beide Maschinen mögen gleich viele Pole besitzen und einphasigen Wechselstrom liefern. Bevor die Parallelschaltung vorgenommen wird, müssen nicht nur die Klemmenspannungen beider Maschinen einander gleich sein, sondern es muss auch Synchronismus bestehen. Um diesen Ausdruck zu erklären, nehmen wir an, dass bei beiden Generatoren gleichzeitig in der früher beschriebenen Weise die Spannungskurve aufgenommen wird. Die Kurven müssen sich bei synchronem Gange und gleicher effektiver Klemmenspannung decken. Es genügt also keineswegs, dass die Tourenzahlen der beiden Maschinen übereinstimmen; wenn diese Forderung erfüllt ist, haben allerdings die beiden Ströme die gleiche Periode, aber die Phasen brauchen dann nicht übereinzustimmen, z. B. kann die eine elektromotorische Kraft in dem Augenblicke einen positiven Höchstwert haben, in dem die andere ein negatives Maximum hat. Zwei Maschinen mit je n Polen, deren (rotierende) Magneträder auf derselben Maschinenachse festgekeilt und richtig ausgerichtet sind, würden immer einen synchronen Gang haben.

Natürlich ist es nicht nötig, dass die Magneträder der beiden parallel zu schaltenden Wechselstromgeneratoren gleich viele Pole haben. Man kann auch Synchronismus erzielen, wenn z. B. die Polzahl bei der einen Maschine 16 und bei

der anderen 8 ist; die zweite Maschine muss dann doppelt so viele Touren machen wie die erste.

Nehmen wir jetzt an, dass bei einer von zwei richtig parallel geschalteten Maschinen die Felderregung verringert wird. Es sinkt dann ihre elektromotorische Kraft, die Maschine nimmt Strom aus der Leitung auf und läuft als Motor weiter. Stellt man also bei der zugehörigen Dampfmaschine den Dampf ab, so wird diese von der Dynamo (dem Motor) angetrieben.

Um einen Einblick in die Wirkungsweise unseres Wechselstrommotors zu gewinnen, fassen wir einen bestimmten Ankerdraht ins Auge. In dem Augenblicke, in dem die Erregung geschwächt wird, die Maschine also anfängt, als Motor zu laufen, nähere sich unserem Drahte ein Nordpol. Der Strom, der aus der Leitung kommt, hat eine solche Richtung, dass infolge der Wechselwirkung zwischen Ankerstrom und Magnetpol eine Zugkraft im Sinne der Drehung auf den Pol ausgeübt wird. Nach $^1/_2$ Periode nähert sich dem Drahte ein Südpol (wenn Synchronismus besteht). Da sich mittlerweile die Richtung des in den Motor fliessenden Stromes geändert hat, so wird auch auf den Südpol eine Zugkraft ausgeübt. Man erkennt leicht, dass unsere Maschine nur solange als Motor laufen kann, wie Synchronismus besteht.

Zunächst ergibt sich aus den vorigen Betrachtungen, dass Synchronmotoren genau so gebaut sind, wie die entsprechenden Generatoren, dass ferner eine Erregung der Feldmagnete durch Gleichstrom erfolgen muss. Diesen liefert entweder eine besondere Erregermaschine oder eine Akkumulatorenbatterie.

Endlich sieht man leicht ein, dass es keineswegs genügt, einen Synchronmotor mit der Leitung zu verbinden, um ihn in Gang zu setzen; der Motor muss vielmehr, ehe man ihm Wechselstrom aus dem Netze zuführt, auf Synchronismus gebracht (in Gang gesetzt) werden (z. B. durch einen kleinen Induktionsmotor).

Arbeitet ein Generator auf einen voll erregten Motor, so läuft der unbelastete Motor mit an, wenn der von vornherein

voll erregte Generator in Gang gesetzt wird. Nehmen wir nämlich an, dass der Anker des Motors der drehbare Teil ist, und fassen wir einen bestimmten Ankerdraht ins Auge. Dieser wird, wenn von vornherein die Periodenzahl des im Generator erzeugten Wechselstromes eine grosse ist, von einem in der Nähe befindlichen Pole in schnellem Wechsel angezogen und abgestossen, so dass keine Bewegung zustande kommt. In unserem Falle liegen aber die Verhältnisse anders. Der Generator fängt nämlich, wenn er in Betrieb gesetzt wird, zunächst mit geringer Tourenzahl an zu laufen, so dass auch die Periodenzahl beim Anlauf klein ist. Dem eben betrachteten Ankerdrahte steht infolge dessen eine längere Zeit zur Verfügung, aus dem Bereiche eines Nordpols in den Bereich eines Südpols überzugehen oder umgekehrt.

Bemerkt sei noch, dass der Phasenverschiebungswinkel bezw. cos φ bei Synchronmotoren von der Stärke der Erregung abhängig ist. Bei einer bestimmten Erregung wird cos $\varphi = 1$. Wird die Erregung noch weiter getrieben, wird der Synchronmotor übererregt, so erfolgt Voreilung des Stromes; der Motor wirkt dann wie ein Kondensator. Synchronmotoren können also benutzt werden, um die durch andere Apparate bewirkte Phasenverschiebung zu kompensieren (Phasenregler).

Die Vorzüge der Synchronmotoren bestehen darin, dass sie bei allen Belastungen mit konstanter Tourenzahl laufen, Überlastungen (allerdings keine grossen) vertragen und als Phasenregler benutzt werden können [1]. Nachteile dieser Motoren sind die Gleichstromerregung, die Schwierigkeit beim Anlassen, ferner der Umstand, dass sie bei grossen Überlastungen stehen bleiben.

2. **Asynchrone Motoren** oder Induktionsmotoren. Zum Betriebe der eben besprochenen Motoren sind zwei Stromquellen nötig, eine, die Gleichstrom liefert für die Felderregung, und eine zweite, die ein- oder mehrphasigen Wechselstrom abgibt. Die Motoren, mit denen wir uns jetzt beschäftigen werden, bedürfen nur einer Stromquelle. Durch den eingeleiteten Strom wird ein sogenanntes Drehfeld erzeugt, durch das in den Drähten eines Ankers Ströme induziert werden. Diese Ströme und das rotierende magnetische Feld üben Kräfte aufeinander aus, durch die der Anker in Rotation versetzt wird.

---

1) Wenn Phasenverschiebung stattfindet, so ist bei einer bestimmten vom Generator abgegebenen Leistung der Netzstrom stärker, als wenn cos $\varphi = 1$ ist (s. S. 151). Es wachsen also mit φ die Verluste in der Leitung. Daher ist Phasenverschiebung eine ungünstige Erscheinung.

Wir wollen uns zunächst mit der Erzeugung des Drehfeldes beschäftigen. Ein rotierendes magnetisches Feld, kurz Drehfeld genannt, erhält man, wenn man einen Magnetstab um eine zur Längsrichtung senkrecht stehende Achse rotieren lässt. Um die Eigenschaften des Drehfeldes zu zeigen, benutzt man besser den in Figur 114 abgebildeten Apparat. Er besteht aus einem Ringe, der aus zwei mit den gleichnamigen Polen zusammenstossenden halbkreisförmigen Magneten zusammengesetzt ist. Dieser Ring ist in einem Gestell um eine horizontale Achse drehbar angeordnet. In seinem Innern kann sich eine genau ausbalancierte Magnetnadel um die gleiche Achse drehen. Wird der Ring mit den freien Polen in Rotation versetzt, so dreht sich die Magnetnadel (man hat ein Drehfeld hergestellt). Wie nun Tesla[1]) zeigte, kann man ein rotierendes magnetisches Feld mittels mehrphasigen Wechselstromes in einem Eisenringe erzeugen. Angenommen, es handle sich um zwei voneinander unabhängige Wechselströme mit 90° Phasenverschiebung (s. S. 152). Die vier Leitungen sind mit den Enden zweier Paare Spulen verbunden, die sich auf einem Eisenringe befinden (s. Fig. 115). Wir wollen unsere Betrachtungen mit dem Momente beginnen, in dem die Stromstärke im ersten Stromkreise ein positives Maximum hat, im zweiten also Null ist. Denken wir uns den Ring für einen Augenblick bei N und S durchgeschnitten, so dass er in eine obere und eine untere Hälfte zerfällt. Durch den in der oberen Spule I fliessenden Strom wird, wenn seine Richtung durch den Pfeil 1



Fig. 114.

1) Nicola Tesla's Untersuchungen über Mehrphasenströme. Deutsche Ausgabe von H. Moser.

bestimmt ist, in der oberen Ringhälfte rechts (bei *N*) ein Nord- und links (bei *S*) ein Südpol erzeugt. Der durch die untere Spule I fliessende Strom erzeugt in der unteren Ringhälfte ebenfalls rechts (bei *N*) einen Nordpol. Schieben wir die beiden Ringhälften jetzt wieder zusammen, so haben wir einen Ringmagnet wie in Figur 114. Eine achtel Periode später fliesst durch die Spulen *I* und *II* Strom; die Stromrichtungen werden durch die Pfeile 1 und 2 angegeben. Der erste Strom sucht wieder in *N*, der zweite aber in *s* einen freien Nordpol zu erzeugen. Die beiden Felder setzen sich zu einem resultierenden Felde zusammen, dessen Nordpol bei *b* und dessen

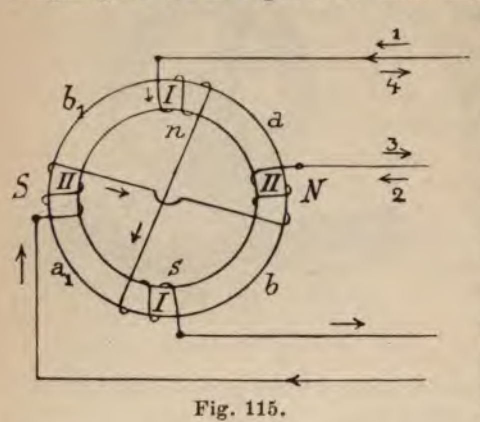


Fig. 115.

Südpol bei b_1 liegt. Da sich nun die Stromstärken nicht sprungweise ändern, sondern kontinuierlich, so ändert auch der (resultierende) Nordpol seine Lage nicht plötzlich; er wandert also während der betrachteten Zeit von *N* nach *b*. Nach abermals $^1/_8$ Periode fliesst durch die erste Spule kein Strom, während der Strom im zweiten Spulenpaare ein positives Maximum hat; der Nordpol liegt jetzt bei *s*. Hat sich der Anker der Zweiphasenmaschine, mit deren Schleifringen unsere vier Leitungen verbunden sind (Figur 85), um 45° weiter gedreht, so haben die Ströme die Richtungen der Pfeile 4 und 3. Jetzt sucht der erste Strom in *S*, der zweite in *s* einen Nordpol zu erregen; der resultierende Nordpol liegt bei a_1 etc. Wir sehen also, dass die magnetische Achse während jeder Periode des Wechselstromes eine Umdrehung macht. An der Stelle, an der sich in einem bestimmten Momente der Nordpol befindet, treten Kraftlinien aus dem Ringe aus, die den Südpol aufsuchen. Das Innere des Ringes ist also mit Kraftlinien, die im grossen Ganzen

parallel zur magnetischen Achse laufen, angefüllt. Da der Nordpol im Ringe herumläuft, so rotieren die Kraftlinien.

Versehen wir den Ring mit drei Spulen mit je 120° Abstand, oder mit sechs Spulen, die 60° voneinander entfernt sind und von denen je zwei sich diametral gegenüberliegende hintereinander geschaltet sind, so können wir wie bei der Drehstrommaschine (Fig. 87) drei Drahtenden kurz miteinander verbinden. Werden nun die drei noch freien Enden mit den drei Leitungen verbunden, die von einer Drehstrommaschine ausgehen, so entsteht in dem Ringe ebenfalls ein rotierendes magnetisches Feld, das während einer Periode einmal herumläuft.

„Eine merkwürdige Wirkung übt das Drehfeld auf Eisenfeilspäne aus. Bringt man solche auf ein Blatt Papier und hält dasselbe aussen dicht an den Ring (der auf dem Tische liegt), so geraten sie in eine vibrierende Bewegung, bleiben aber auf derselben Stelle, wenn auch das Papier hin- und herbewegt wird. Hebt man aber das Papier bis zu einer gewissen Höhe, welche von der Stärke der Pole und der Geschwindigkeit der Rotation abhängig ist, so werden die Eisenteilchen in einer Richtung fortbewegt, die der angenommenen Bewegungsrichtung der Pole stets entgegengesetzt ist.“ (Tesla, l. c. S. 15.)

Bei experimentellen Untersuchen über Drehfelder kann man das von Du Bois-Reymond zuerst angewandte Verfahren[1]) benutzen. Ein Eisenring wird mit einer fortlaufenden in sich geschlossenen Wickelung versehen und die Wickelung in drei oder vier gleiche Teile zerlegt. Jeder Teil wird mit Gleichstrom erregt, und zwar werden die Stromstärken für jede Beobachtung (Papier mit Eisenfeilspänen) so gewählt, dass sie den Phasenströmen gleich sind. Will man z. B. das Drehfeld, das durch Dreiphasenstrom erzeugt wird, studieren, so schickt man durch Spule 1 den Strom 0 Amp., Spule 2 erregt man mit 8 Amp. und Spule 3 mit —8 Amp., später Spule 1 mit 8 Amp., Spule 2 mit 0 Amp., Spule 3 mit —8 Amp. etc.

Die richtigen Stromstärken kann man mit Hülfe eines Stromverteilungsapparates leicht herstellen (s. Figur 116 S. 194), der mit einer Stromquelle verbunden wird. Statt der beiden gekreuzten

1) Elektrot. Zeitschr. 1891, S. 303, oder Handb. der Elektrot. I, 2 S. 147.

Spulen (Fig. 116) kann man Eisenringe mit vier oder sechs Spulen mit dem Verteilungsapparate verbinden.

In den Figuren 117 und 118 ist eine für Demonstrationen ebenfalls sehr gut geeignete Anordnung (E. Leybolds Nachfolger) abgebildet. Die Zweiphasenstrommaschine besteht aus einem Ringe,

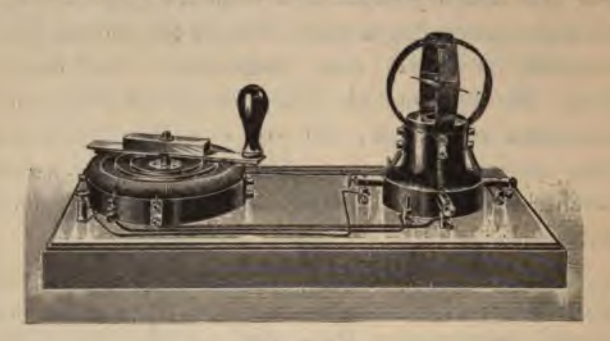


Fig. 116.

auf dem sich 2 Spulenpaare befinden, die aus rot und grün umsponnenen Drahte gewickelt sind. Im Innern befindet sich ein Elektromagnet, der in Rotation versetzt werden kann; ihm wird durch zwei Schleiffedern Strom zugeführt. Die Modelle für Drehstromversuche enthalten drei Paar Spulen. Von den sechs Klemmen des Ringes werden, wenn man Sternschaltung herstellen will, die erste, dritte und fünfte miteinander verbunden, an die drei übrigen Drähte werden die Leitungsdrähte befestigt, die mit den entsprechenden Klemmen des Motors (Fig. 118) verbunden werden.

Bis jetzt wurde angenommen, dass der feststehende Teil des Elektromotors, der sogenannte Ständer (Stator), zweipolig gewickelt ist. In diesem Falle ist die Tourenzahl des Drehfeldes oder eines im Ringe drehbar angeordneten Eisenstabes gleich der Periodenzahl des eingeleiteten Wechselstromes. Bei der üblichen Frequenz von 50 pro Sekunde würde der Motor die enorme Tourenzahl von 3000 in der Minute haben. Um die Tourenzahl zu verringern, benutzt man die mehrpolige Wickelung. Denken wir uns z. B. in Figur 115 die vier Spulen so zusammengeschoben, dass sie nur die obere Hälfte des Ringes bedecken, so können wir auf der unteren Hälfte ebenfalls zwei Paar Spulen anbringen und diese mit den oberen Spulen parallel oder in Reihe schalten. Das

rotierendeFeld macht jetzt, da die Pole zwischen den Spulen liegen, während einer Periode nur eine halbe Umdrehung, so dass die Tourenzahl des Rotors, von dem gleich die Rede sein wird, auf die Hälfte reduziert wird.

Wenn der Stator einpolig gewickelt ist, so entspricht das Drehfeld dem Felde eines rotierenden Magnets; bei der mehrpoligen Wickelung haben wir ein Drehfeld, das demjenigen eines rotierenden 4-, 6-etc.-poligen Magnetrades entspricht. Befindet sich daher innerhalb unseres Eisenringes *R* ein zweiter Eisenring *r* (Fig. 119 S. 196), den wir uns zunächst feststehend denken, und auf dem sich einzelne kurz geschlossene Windungen oder kurz geschlossene Spulen oder endlich eine einzige fortlaufende, in sich geschlossene Wickelung befindet, so werden in den Drähten dieses zweiten Ringes, des Ankers, gerade so Ströme induziert wie im Anker einer Dynamo, deren Magnetsystem



Fig. 117.



Fig. 118.

rotiert. Die in den einzelnen Drähten induzierten Ströme sind Wechselströme, weil an einer bestimmten Windung bald ein Nord-, bald ein Südpol vorbeigeht. Die induzierten Ströme und die rotierenden Pole üben tangentiale Kräfte aufeinander aus, und zwar sind diese Kräfte so gerichtet, dass sie die Bewegung des Drehfeldes zu hemmen suchen [1]). Ist nun der zweite Ring drehbar angeordnet, so gerät er in Rotation, und zwar dreht er sich in demselben Sinne wie das Drehfeld.

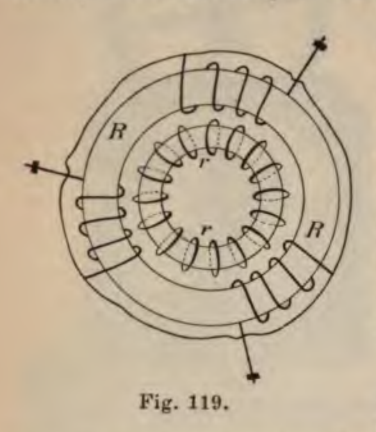


Fig. 119.

Offenbar kann die Tourenzahl des rotierenden Ankers, den man den **Rotor** nennt, nicht ganz so gross sein wie diejenige des Drehfeldes. Wäre nämlich die synchrone Umlaufszahl die wirkliche, so würden die Ankerdrähte gerade so schnell rotieren wie das im Ständer erzeugte Drehfeld. Da nun in den Drähten des Läufers nur dann Ströme induziert werden, wenn sie von Kraftlinien geschnitten werden, so würde der Anker bei der gemachten Annahme stromlos sein. Die Entstehung der Induktionsströme (eines zweiten Feldes) ist aber Grundbedingung für die Rotation des Ankers. Weil das Ankerfeld durch Induktionsströme hervorgerufen wird, nennt man die asynchronen Motoren [2]) auch **Induktionsmotoren**. Je mehr der Motor belastet wird, um so mehr muss die Tourenzahl von der synchronen Umlaufszahl abweichen; denn um so stärker müssen die Induktionsströme werden.

Die im Anker induzierten Ströme wirken auf das primäre Feld zurück, und zwar in der Weise, dass die Selbstinduktion in

1) Eine Verringerung der Umlaufsgeschwindigkeit des Drehfeldes tritt aber nicht ein, da diese nur von der Periodenzahl des eingeleiteten Wechselstromes abhängig ist.

2) Asynchron, weil die synchrone Tourenzahl nicht erreicht werden kann.

der Statorwickelung verringert wird. Die Abnahme der Selbstinduktion hat aber eine Zunahme der Stromstärke (des eingeleiteten Stromes) zur Folge. Mit steigender Belastung nimmt also der Motor mehr Strom aus dem Netze auf (s. auch S. 203).

Das Zurückbleiben des Rotors hinter der der synchronen Umlaufszahl entsprechenden Geschwindigkeit bezeichnet man als Schlüpfung. Bei Leerlauf beträgt sie noch nicht 1 %, bei Vollbelastung etwa 5—6 % der synchronen Umlaufszahl. Ist also die Frequenz gleich 50 und der Stator vierpolig gewickelt, so beträgt die Tourenzahl bei Vollbelastung 0,95 bis 0,94 mal 1500.

Mit Rücksicht auf den Rotor kann man die asynchronen Motoren einteilen in solche mit Kurzschlussanker und solche mit offener Wickelung (Phasenanker). Die vorhin erwähnten Anker gehören zu der ersten Gruppe, ebenso der sogen. Käfiganker. Dieser besteht aus einem Eisencylinder, auf dessen Oberfläche sich parallel zur Achse laufende Nuten oder Kanäle befinden, die zur Aufnahme der Kupferdrähte oder Kupferstäbe *S* (Figur 120) dienen. Die Drähte werden an den beiden Enden durch Kupferbänder *B* miteinander verbunden.

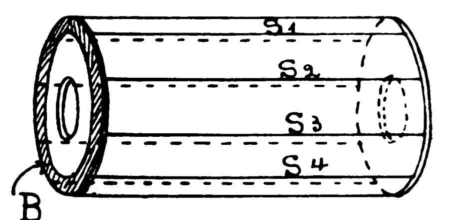


Fig. 120.

Dadurch dass die Drähte in der beschriebenen Weise angebracht werden, wird ermöglicht, dass man den Zwischenraum zwischen dem Stator und dem Anker sehr klein machen kann. Durch die Verkleinerung des Luftzwischenraumes werden der magnetische Widerstand und die Streuung verringert, die Induktionswirkung wird also verstärkt.

Wenn man einen Motor mit Kurzschlussanker mit den Leitungen verbindet, so ist der in den Ankerdrähten erzeugte Strom und daher auch, wie sich aus den vorhergehenden Betrachtungen ergibt, der in den Stator fliessende Strom sehr stark (siehe Seite 183). Den Kurzschlussanker verwendet man daher nur in besonderen Fällen für grössere Motoren.

Bei den Phasenankern besteht die Wickelung aus drei Phasen, sie werden genau so gewickelt wie die Ständer; die drei freien Enden werden mit drei auf der Achse sitzenden

Schleifringen verbunden, auf denen feststehende Bürsten liegen. Diese stehen in Verbindung mit einem dreiteiligen Widerstand, dem Anlasser. Ein solcher ist in Fig. 121 schematisch dargestellt; K_1, K_2, K_3 sind drei fest miteinander verbundene Kurbeln, O ist also der neutrale Punkt. Die Schleifringe sind durch die Punkte S_1, S_2, S_3 angedeutet. Bevor man den Stator mit dem Netze verbindet, müssen die drei Kurbeln die ersten Kontakte ihres Widerstandes berühren. Die induzierten Ströme werden, da sie den ganzen Widerstand durchfliessen, stark geschwächt, daher auch der Leitungsstrom (vgl. S. 203). Kommt der Motor auf Touren, so werden die induzierten Ströme schwächer, und man verringert den Widerstand im sekundären Stromkreise. Berühren die drei Kurbeln die letzten Kontakte a, b, c, so sind die drei Schleifringe kurz geschlossen.

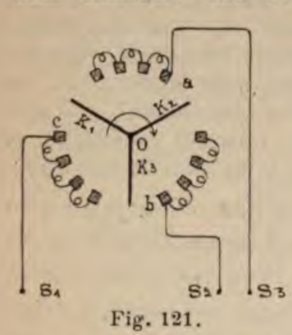


Fig. 121.

3. **Asynchrone Einphasenmotoren.** Die gewöhnlichen asynchronen Einphasenmotoren leiden an erheblichen Mängeln und haben deshalb keine sehr grosse Verbreitung gefunden. Sie sollen daher auch nur kurz behandelt werden.

Mittels einphasigen Wechselstromes kann man, wenn nicht besondere Kunstgriffe angewendet werden, ein rotierendes magnetisches Feld nicht erzeugen. Nehmen wir z. B. an, dass dem in Fig. 98 (S. 163) gezeichneten Ringe einphasiger Wechselstrom zugeführt wird. Der Nordpol liegt dann während der ersten halben Periode an einer bestimmten Stelle im Ringe, der Südpol liegt ihm diametral gegenüber. Der Kraftlinienfluss steigt und fällt mit dem Strome. Ändert sich die Stromrichtung (zweite halbe Periode), so springt der Nordpol dahin, wo eben der Südpol war. Das Feld ist also ein o s z i l l i e r e n d e s.

Da nun das Drehmoment (die Zugkraft des Rotors) proportional dem Statorfelde ist, und dieses zwischen dem Werte Null und einem Maximalwerte schwankt, so pulsiert auch das Drehmoment.

Wenn der Anker ruht, so wird durch das pulsierende Feld

des Stators in dem Rotor ein Feld erzeugt, das im wesentlichen dieselbe Richtung hat wie das primäre Feld. Diesen beiden Feldern entspricht kein Drehmoment. Daher kann der Motor nicht von selbst angehen. Ist der Motor auf irgend eine Weise auf Touren gebracht, so wird in den rotierenden (die primären Kraftlinien schneidenden) Ankerdrähten eine neue elektromotorische Kraft induziert. Ankerfeld und Statorfeld stehen bei synchronem Laufe nahezu senkrecht aufeinander und setzen sich zu einem Drehfelde zusammen.

Die einphasigen asynchronen Motoren laufen, wie wir sahen, nicht von selbst an. Das Anlassen geschieht meistens in der Weise, dass man eine sogenannte Hülfsphase herstellt. Zu dem Zwecke versieht man den Stator mit einer zweiten Wickelung, die aus dünnem Drahte hergestellt wird und gegen die Hauptwickelung räumlich um 90° versetzt ist. Schaltet man vor die Hülfswickelung noch eine Drosselspule (Spule mit Eisen, induktiven Widerstand), so wird der durch sie fliessende Strom in seiner Phase gegen den Hauptstrom stark verschoben, und es entsteht ein Drehfeld. Man lässt also, kurz gesagt, den Motor beim Anlassen, während der Einschaltoperation, als Zweiphasenmotor laufen. Hat der Motor seine normale Tourenzahl erreicht (läuft der Rotor nahezu synchron), so wird die Hülfswickelung ausgeschaltet.

Während des Anlassens darf der Motor nicht bezw. nur schwach belastet sein. Wird der Einphasenmotor zu stark belastet, so fällt er aus dem Tritt und bleibt stehen.

In den letzten Jahren sind Einphasenmotoren konstruiert worden, die weit vollkommener sein sollen als die gewöhnlichen. Sie besitzen einen Anker mit Kommutator und Bürsten. Die verschiedenen Konstruktionen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, werden unter dem Namen asynchrone Kommutatormotoren zusammengefasst.

Dreizehntes Kapitel.

Transformatoren und Umformer.

1. **Zweck der Transformation.** Wenn die Entfernung zwischen dem Orte, an dem sich eine Kraftquelle (z. B. eine Wasserkraft) befindet, und dem Orte, wo der elektrische Strom für Licht- oder Kraftzwecke Verwendung finden soll, eine grosse ist, so muss man, um die Verluste in den Leitungsdrähten zu verringern, Ströme hoher Spannung in die Fernleitung schicken. Bei sehr grosser Entfernung zwischen Krafterzeugungs- und Kraftverbrauchsort kann man auch in den Wechselstrommaschinen nicht die Spannung erzeugen, die man aus ökonomischen Rücksichten haben muss. Anderseits muss den Konsumenten ein Strom von geringerer Spannung zur Verfügung gestellt werden. Um nun die Spannung des in der Wechselstrommaschine — Gleichstrom eignet sich nicht für die Transformation — erzeugten Stromes nach Belieben zu erhöhen und den hochgespannten Strom am Verbrauchsorte in niedrig gespannten Strom umzuwandeln, bedient man sich der Transformatoren.

2. **Prinzip und Einteilung.** Ein Transformator besteht, wie die schon besprochenen Induktionsapparate, aus einer primären, einer sekundären Wickelung und einem Eisenkern. Als Schema diene die Figur 122, in welcher der Eisenkern mit *E*, die primäre Wickelung mit *pr* und die sekundäre mit *sec* bezeichnet ist. Schickt man durch die primäre Spule Wechselstrom, so wird in der sekundären Spule ein Wechselstrom induziert; denn es ändert sich die Stärke und Richtung des Kraftlinienflusses fortwährend. Nennen wir die Anzahl der primären Win-

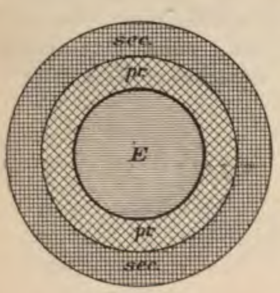


Fig. 122.

dungen p und die der sekundären s, so ist $\frac{p}{s}$ der **Transformationskoeffizient** oder das **Übersetzungsverhältnis** (oder kurz die Übersetzung).

Streng genommen ist das Übersetzungsverhältnis das Verhältnis der primären (effektiven) Spannung E_1 zur sekundären Spannung E_2, also der Bruch $\frac{E_1}{E_2}$. Es ist jedoch mit grosser Annäherung $\frac{p}{s} = \frac{E_1}{E_2}$.

Ist der Transformationskoeffizient grösser als 1, d. h. ist die Anzahl der primären Windungen grösser als die der sekundären Windungen, so ist die Spannung des sekundären Stromes kleiner als diejenige des primären Stromes; ist das Verhältnis aber kleiner als 1, so hat der sekundäre Strom die höhere Spannung. Durch passende Wahl des Bruches $\frac{p}{s}$ kann man dem sekundären Strome jede gewünschte Spannung geben.

Um die Verluste durch Wirbelströme und infolge der Hysteresis zu verringern, setzt man den Eisenkern aus Blechen oder Drähten zusammen, die gegeneinander isoliert sind.

Mit Rücksicht auf den magnetischen Kreis unterscheidet man zwischen **offenen** und **geschlossenen** Transformatoren. Der in Fig. 123 schematisch gezeichnete Transformator gehört zu der ersteren Kategorie. Die an dem einen Ende austretenden Kraftlinien müssen durch die Luft hindurchgehen, um zu dem anderen Ende zu gelangen; die Streuung ist eine grosse und daher auch die Leerlaufsarbeit (s. diese). Offene Transformatoren sind daher fast gar nicht im Gebrauche. Um den magnetischen Widerstand zu verringern, biegt man nach dem Vorschlage **Swinburnes** die Drähte oder Bleche des Eisenkerns oben und unten auseinander bezw. um. Man nennt diese Type **Igeltransformator**.

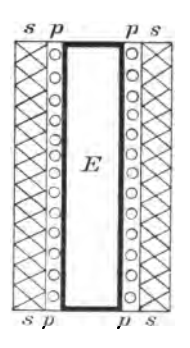
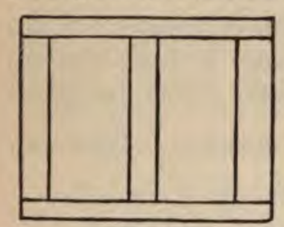


Fig. 123.

Aus zwei offenen Transformatoren erhält man einen geschlossenen, wenn man die Eisenkerne oben und unten durch

eine Eisenplatte miteinander verbindet. Bei diesen haben wir einen geschlossenen magnetischen Kreis, ähnlich wie bei einem hufeisenförmigen Elektromagnet mit angelegtem Anker. Während bei den Kerntransformatoren die Spulen (die primären und sekundären meist abwechselnd) das Eisen umgeben (Schema, Fig. 122), bilden bei den Manteltransformatoren die Spulen den inneren Teil, sie werden von dem Eisen allseitig eingehüllt.

Drehstromtransformatoren bestehen aus drei Einphasentransformatoren, die zu einem Apparate vereinigt werden (s. Fig. 124, in der die Kerne ohne Wickelung abgebildet sind).


Fig. 124.

Die Wickelungen können nach der Stern- oder nach der Dreieckschaltung miteinander verbunden werden. Im ersteren Falle werden die Anfänge der drei Wickelungen mit den Klemmen verbunden, die drei Enden nach einem Punkte hingeführt; dies gilt sowohl für die primären wie für die sekundären Wickelungen. Ein Drehstromtransformator hat also 6 Klemmen, 3 primäre und 3 sekundäre (ev. eine vierte für die neutrale Leitung).

Bei Transformatoren für sehr hohe Spannungen bettet man die einzelnen Teile oder nur die Hochspannungswickelung (Teslatransformator) in Öl ein, da dieses ein ausgezeichneter Isolator ist — Öltransformatoren.

3. **Leerlaufender und belasteter Transformator.** Wenn die sekundäre Wickelung keinen Strom abgibt (Leerlauf), so verhält sich der Transformator wie ein Elektromagnet oder wie eine Drosselspule. Die Selbstinduktion ist dann sehr gross, ihre elektromotorische Kraft ist fast gleich der Spannung des primären Stromes und die Phasenverschiebung zwischen der Spannung und dem (primären) Strome ist nahezu 90°. Die der primären Wickelung zugeführte (in Wärme umgesetzte) Energie (pro Sek.) ist aber, wenn es sich um Einphasenstrom handelt, durch den Ausdruck gegeben $E. J. \cos\varphi$ (s. S. 151). Ist nun φ nahezu 90°, so ist $\cos\varphi$ fast Null, das Produkt

E. J. cos φ hat also einen kleinen Wert, d. h. der leerlaufende Transformator verbraucht nur wenig Energie.

Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist gegen den Strom um 90° verschoben, sie ist nämlich, wenn der Strom sein Maximum hat, gleich Null. Nun ist aber der induzierende (der primäre) Strom gegen die Spannung des Wechselstromes (den die Dynamo liefert) ebenfalls um (nahezu) 90° verschoben. Daher ist die induzierte Spannung (elektromotorische Kraft der Selbstinduktion) gegen die Maschinenspannung um 180° verschoben, beide heben sich also in jedem Momente auf.

Wird die sekundäre Wickelung belastet, so wirkt der sekundäre Strom auf die primäre Wickelung zurück: es wird ein neues Feld erzeugt, das dem primären entgegenarbeitet. Das resultierende Feld ist also schwächer als das bei Leerlauf vorhandene. Dies hat zur Folge, dass die elektromotorische Kraft des in der primären Wickelung induzierten Stromes (die gegenelektrom. Kraft) abnimmt. Mithin wächst der primäre Strom; offenbar wird er um so stärker, je mehr die sekundäre Wickelung belastet wird (je mehr Lampen und Motoren eingeschaltet werden).

Die Leistung, welche die primäre Wickelung aus der Leitung aufnimmt, wächst mit der Belastung, und zwar nicht nur weil J zunimmt, sondern auch weil cos φ wächst bezw. φ kleiner wird.

Es sei hier auf einen Versuch mit einfachen Hülfsmitteln aufmerksam gemacht, der sehr gut geeignet ist, das Verhalten eines Transformators zu demonstrieren. Es möge ein Anschluss an eine Wechselstromzentrale mit 110 Volt vorhanden sein. Man schalte etwa 8 Glühlampen (16 Kerzen) parallel und schalte die Lampengruppe mit der primären Spule eines Induktionsapparates in Reihe. Es genügt schon den in Fig. 69 S. 122 abgebildeten kleinen Schlittenapparat zu benutzen. Die Lampen brennen hell; steckt man das Eisendrahtbündel *B* (in Figur 69) in die Spule hinein, so brennen die Lampen dunkel. Schiebt man die sekundäre Spule über die primäre, so ändert sich die Helligkeit nicht (leerlaufender Transformator); werden endlich die sekundären Klemmen durch einen Draht miteinander verbunden, so brennen die Lampen heller (Rückwirkung des sekundären Feldes).

4. **Wirkungsgrad der Transformatoren.** Die Transformation ist mit Energieverlusten verbunden. Diese bestehen aus der sowohl in der primären als auch in der sekundären

Spule erzeugten Jouleschen Wärme (Kupferverluste), ferner aus derjenigen Energie, die für die Erzeugung der Foucaultschen Ströme, die nicht ganz vermieden werden kann, verbraucht wird, endlich aus der Arbeit, die für die Überwindung der Koerzitivkraft des Eisens verbraucht wird, das bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung magnetisiert wird. (Die beiden letzteren Verluste nennt man die Eisenverluste.)

Das Verhältnis zwischen dem Effekte des sekundären und demjenigen des primären Stromes nennt man den Wirkungsgrad des Transformators. Es ist leicht einzusehen, dass der Wirkungsgrad, der, wie bei den Dynamomaschinen, in Prozenten der zugeführten Leistung angegeben wird, mit der Belastung wächst. Er beträgt bei grossen Transformatoren 97—98 %.

Die oben genannten Verluste sind auch vorhanden, wenn der Transformator leer läuft. Die Leerlaufsarbeit beträgt etwa 3 % der Vollbelastung. Ist die primäre Wickelung immer mit der Leitung verbunden, und gibt die sekundäre Wickelung nur zeitweise Strom ab, so wird durch die Leerlaufsarbeit der auf einen längeren Zeitraum bezogene Wirkungsgrad herabgedrückt. Man hat daher Apparate ersonnen, mittels deren man die primäre Wickelung abschalten kann, wenn der Transformator keine Leistung abgibt (Fernschalter).

5. **Umformung.** (Verwandlung einer Stromart in eine andere, Erhöhung und Erniedrigung der Spannung bei Gleichstrom.) Oft liegt das Bedürfnis vor, eine Stromart in eine andere zu verwandeln (umzuformen), z. B. Einphasenstrom in Gleichstrom. Diese Aufgabe wird in der Technik nach zwei verschiedenen Methoden gelöst. Die erste Methode besteht darin, dass man einen Motor mit dem umzuformenden Strome betreibt und mit diesem eine Dynamo kuppelt, in der die gewünschte Stromart erzeugt wird. Eine solche Kombination von zwei elektrischen Maschinen nennt man Motorgenerator. Die Verwendung eines Motorgenerators hat den Vorzug, dass man die Spannung des erzeugten Stromes leicht ändern kann.

Die Umwandlung kann aber auch in einem gemeinsamen Anker erfolgen (rotierender Umformer). Hierauf wurde

schon früher hingewiesen. Es möge sich um die Umformung vom Einphasenstrom von 100 Volt effektiver Spannung in Gleichstrom handeln. Den betreffenden Umformer erhält man aus einer Gleichstrommaschine, indem man zwei sich diametral gegenüberliegende Punkte der Wickelung (Ringanker) mit zwei auf der Ankerachse angebrachten Ringen verbindet, auf denen Bürsten schleifen. Da die Maschine als Synchronmotor läuft, so muss man den Umformer künstlich anlassen. Dieses kann entweder von der Wechselstromseite (s. S. 188) oder von der Gleichstromseite aus geschehen; letzteres ist natürlich nur dann möglich, wenn eine Gleichstromquelle, z. B. eine Akkumulatorenbatterie, vorhanden ist. Der Motor wird mit der Wechselstromleitung verbunden, wenn die für die Parallelschaltung von Wechselstromgeneratoren früher angegebenen Bedingungen erfüllt sind.

Wechselstrom- und Gleichstromspannung stehen bei einem rotierenden Umformer in einem bestimmten Verhältnisse zueinander, das nach Uppenborn (Kalender) theoretisch gleich $\sqrt{\frac{1}{2}} = 0{,}707$. An den Bürsten des Kommutators steht also eine Spannung von $100:0{,}707 = 141$ Volt zur Verfügung. Bei Drehstrom-Gleichstromumformern geben theoretisch $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot 100 = 61$ Volt Spannung des zugeführten Drehstromes (Spannung zwischen zwei Schleifringen) 100 Volt Gleichstromspannung (in Wirklichkeit etwa 96—97 Volt).

In Figur 125 (S. 206) ist ein Umformer abgebildet, mittels dessen man Gleichstrom in Einphasen- oder in Drehstrom umformen kann. Zunächst sind auf der Wechselstromseite drei Schleifringe für die Abnahme des Drehstromes vorhanden. Diese sind mit drei Punkten A_1, A_2, A_3 der Wickelung verbunden, deren Abstand 120^0 beträgt. Will man dem Anker Einphasenstrom entnehmen, so müssen zwei um 180^0 entfernte Punkte der Wickelung mit Schleifringen verbunden werden. Demnach muss noch ein vierter Schleifring angebracht werden, der mit einem Punkte der Wickelung zu verbinden ist, der z. B. A_1 diametral gegenüberliegt.

Die Maschine ist mit Riemenscheibe versehen und kann als Gleichstrommotor sowie als Dynamo für Abgabe von Gleich-, Einphasen- und Drehstrom benutzt werden.

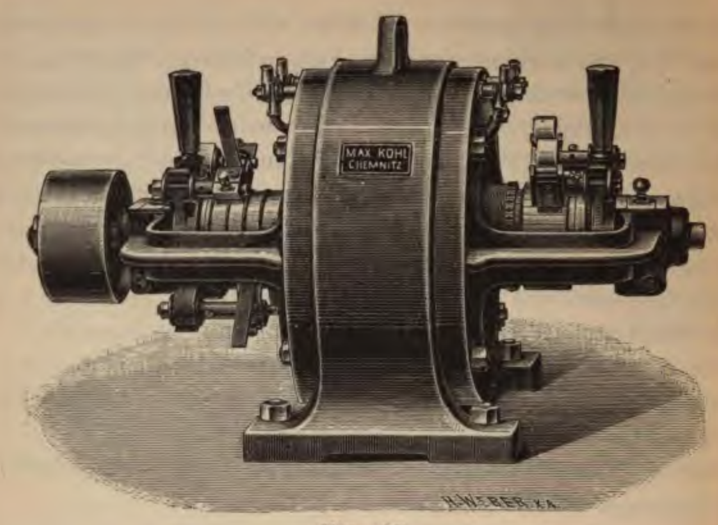


Fig. 125.

Im nächsten Kapitel werden wir noch eine andere Methode kennen lernen, Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln.

Vierzehntes Kapitel.

Grundbegriffe der Elektrochemie, Theorie der galvanischen Elemente und der Elektrolyse.

---

1. **Der osmotische Druck.** Löst sich eine Substanz in einer Flüssigkeit, z. B. Zucker in Wasser, so nennt man die betreffende Flüssigkeit das L ö s u n g s m i t t e l. Wir beschränken uns im Folgenden nur auf wässerige Lösungen. Zu den Lösungen werden auch die verdünnten Säuren gerechnet. Der Vorgang der Lösung (Zucker in Wasser) besteht darin, dass sich die Moleküle voneinander trennen und sich in dem Lösungsmittel verteilen. Man muss also den in Lösung gehenden Substanzen eine Tendenz zuschreiben, ihre Moleküle

in die Flüssigkeit zu treiben — Lösungstension. Je mehr Zucker sich in einer bestimmten Wassermenge löst, um so grösser wird die Konzentration der Lösung. Als Maß für diese dient die Anzahl Grammoleküle der gelösten Substanz in 1 Liter der Lösung.

Unter einem Grammolekül einer Substanz versteht man so viele Gramme der Substanz, wie das Molekulargewicht angibt; z. B. ist ein Grammolekül NaCl gleich 23 + 35,6 = 58,6 g NaCl. Statt Grammolekül sagt man kurz Mol. Lösungen gleicher Konzentration enthalten in der Volumeneinheit die gleiche Anzahl von Molekülen der gelösten Substanz.

Um uns über das, was man unter dem osmotischen Drucke versteht, Klarheit zu verschaffen, denken wir uns folgenden Versuch ausgeführt. Ein Standglas mit vorspringendem Rande fülle man mit einer sirupartigen Zuckerlösung und verschliesse es mittels einer vorher in lauwarmem Wasser aufgeweichten Schweinsblase, wobei darauf zu achten ist, dass keine (oder nur wenig) Luft eingeschlossen wird. Durch einen Bindfaden ist die Membran unterhalb des Glasrandes gut zu befestigen. Stellt man das Präparat (die Zelle) in ein grösseres, mit Wasser gefülltes Gefäss, so findet man nach etwa 24 Stunden, dass sich die Membran stark gewölbt hat, und wir schliessen, dass die Zuckerlösung auf die Membran einen Druck ausgeübt hat. Da die Wölbung nicht erfolgt, wenn das Standglas mit Wasser gefüllt wird, so ist weiter zu schliessen, dass der Druck durch die Zuckermoleküle ausgeübt wird.

Die Schweinsblase hat die Eigenschaft[1]), den Wassermolekülen den Durchgang zu gestatten, nicht aber den Zuckermolekülen, sie ist halbdurchlässig oder semipermeabel. Denken wir uns nun die Zeit in sehr kleine Intervalle eingeteilt, so können wir uns die Vorgänge in der Zelle etwa folgendermaßen erklären: Die Zuckermoleküle üben (wie die Moleküle eines Gases) auf die Membran einen Druck aus; diese wird um ein unendlich kleines Stück gehoben, in den freien Raum dringt Wasser ein. Während des folgenden Zeit-

1) Allerdings nicht vollkommen; mit wachsendem Drucke wird der Unterschied in der Durchlässigkeit immer kleiner.

abschnittes wiederholt sich das Spiel u. s. w. Die Membran wölbt sich also langsam im Laufe der Zeit. Dem osmotischen Drucke der Zuckermoleküle — so nennt man den auf die Membran ausgeübten Druck — wirkt die elastische Spannung der Blase entgegen. Nimmt man an, dass die Schweinsblase vollkommen, auch bei grosser Spannung halbdurchlässig ist, und dass sie jeden beliebig hohen Druck auszuhalten vermag, ohne zu platzen, so ist leicht einzusehen, dass sich nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewichtszustand ausbildet, und zwar ist dieser dann vorhanden, wenn der osmotische Druck der Zuckermoleküle (Aktion) gleich ist der Spannung der Membran (Reaktion). Der nach Innen gerichtete Druck der gespannten Membran nach Eintritt des Gleichgewichtszustandes, d. h. wenn eine weitere Wölbung der Membran nicht mehr erfolgt, ist gleich dem osmotischen Drucke.

Auch in folgender Weise gelangt man zu einer Vorstellung über den osmotischen Druck. Wenn man bei Beginn des Versuches die Membran belastet, etwa durch Auflegen von Gewichtsteinen, so erfolgt das Eindringen des Wassers langsamer als eben; bei einer gewissen Belastung wölbt sich die Membran überhaupt nicht. Beträgt die gerade hinreichende Belastung pro 1 cm^2 Oberfläche p kg, so ist p ein Maß für den osmotischen Druck. — Auf die verschiedenen Versuche über den osmotischen Druck kann wegen Raummangels nicht eingegangen werden [1]).

Der osmotische Druck wächst mit der Konzentration und der Temperatur der Lösung, überhaupt gelten für ihn dieselben Gesetze wie für Gase (Pfeffer).

2. **Die elektrolytische Dissoziation, freie Ionen.** Den osmotischen Druck einer Lösung von bekannter Konzentration und Temperatur kann man leicht berechnen. Der theoretische osmotische Druck werde mit p_r bezeichnet. Messungen ergaben nun, dass zwischen p_r und dem gemessenen (wirklichen)

1) Es sei an dieser Stelle auf folgende Werke hingewiesen: Le Blanc, Lehrbuch der Elektrochemie; Arrhenius-Euler, Lehrbuch der Elektrochemie; Danneel, Elektrochemie I (Sammlung Göschen); Lüpke, Grundzüge der Elektrochemie (Anleitung zu Experimenten); Nernst, Theoretische Chemie.

osmotischen Drucke (p_w) in vielen Fällen eine grosse Differenz bestand. Man fand, dass nur bei denjenigen Lösungen $p_r = p_w$, die den elektrischen Strom nicht leiten; bei allen Elektrolyten jedoch ergaben sich für p_w Werte, die (z. T. bedeutend) grösser sind als p_r.

Eine analoge Erscheinung, nämlich eine abnorme Dampfdichte, hatte man schon früher bei einzelnen Gasen bezw. Dämpfen beobachtet. Bekannte Beispiele sind Salmiak (NH_4Cl) und Stickstofftetroxyd (N_2O_4). Für Salmiak fand man eine nahezu halb so grosse Dampfdichte, als sie der Molekularformel gemäss sein müsste. Diese Abnormität erklärte man durch die Annahme, dass sich die Salmiakmoleküle bei der hohen für die Verdampfung erforderlichen Temperatur in NH_3 und HCl spalten oder sich dissoziieren. N_2O_4 ist für einen Versuch sehr gut geeignet, da die Komponenten NO_2 eine rote Farbe haben. Man schliesst N_2O_4 in ein Gläschen ein, kühlt dieses in Eiswasser ab, erwärmt dann etc.

Arrhenius zog den Schluss, dass in Lösungen, die einen anormal hohen osmotischen Druck aufweisen, die gelösten Stoffe (Salze, starke Säuren und Basen) dissoziiert seien. Nehmen wir an, ein Molekül der gelösten Substanz spalte sich in zwei Komponenten A und B. Jede der Komponenten haben wir, was (den Gasdruck und) den osmotischen Druck anbelangt, als ein Molekül anzusehen. Da der osmotische Druck proportional der Anzahl der in 1 cm^3 Lösung enthaltenen Moleküle ist, so folgt, dass die Dissoziation zu einer Vergrösserung des osmotischen Druckes führt. Sind sämtliche Moleküle der gelösten Substanz dissoziiert, so sagt man, die Dissoziation sei eine vollständige. Eine solche haben wir nur in einer sehr stark verdünnten Lösung vor uns. Wenn sich ein Gas bei höherer Temperatur spaltet, so sind die Teile unelektrisch, findet aber Dissoziation in einer Lösung statt, so sind die Komponenten elektrisch geladen, und man nennt sie Ionen, d. h. die Wandernden (Erklärung s. S. 211).

Den Satz, dass nur diejenigen Lösungen den elektrischen Strom leiten, bei denen $p_w > p_r$, können wir jetzt folgendermaßen formulieren: Nur diejenigen Lösungen leiten den elektrischen Strom (unter gleichzeitiger Zersetzung, Elektrolyse), in denen sich freie Ionen befinden.

Man nennt die in Lösungen stattfindende Dissoziation die elektrolytische Dissoziation.

Als Beispiel diene eine wässerige Kochsalzlösung. Eine 1%ige Lösung von NaCl müsste (wenn keine Dissoziation stattfände) einen osmotischen Druck von 3,5 Atmosphären haben, in Wirklichkeit beträgt der osmotische Druck 7 at. Die Komponenten können nur Na und Cl sein. Nun ist nicht leicht einzusehen, wie denn überhaupt Natriumatome in Wasser existieren können. Da ist zu berücksichtigen, dass die Dissoziation überhaupt keine Natriumatome liefert, sondern Natriumionen. Ein solches fasst man am einfachsten als eine neue chemische Verbindung zwischen einem Natriumatom und einem positiven Elektron (siehe S. 33) auf. Das Cl-Ion haben wir demgemäss als eine chemische Verbindung zwischen einem Chloratom und einem negativen Elektron anzusehen. Wird die Verbindung (Aneinanderlagerung) eines positiven und eines negativen Elektrons Neutron genannt und dieses mit dem Symbol $\oplus - \ominus$ bezeichnet, so kann der Dissoziationsvorgang durch die Gleichung versinnlicht werden:

$$NaCl + \oplus - \ominus = Na - \oplus + Cl - \ominus = \overset{+}{Na} + \overset{-}{Cl}.$$

In ähnlichem Sinne sind die folgenden Gleichungen aufzufassen:

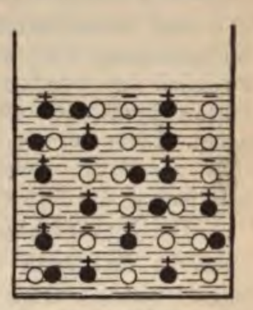
$$HCl = \overset{+}{H} + \overset{-}{Cl}$$
$$CuCl = \overset{+}{Cu} + \overset{-}{Cl}$$
$$CuCl_2 = \overset{++}{Cu} + \overset{-}{Cl} + \overset{-}{Cl}$$
$$H_2SO_4 = \overset{+}{H} + \overset{+}{H} + \overset{=}{SO_4}.$$

Für einen Versuch über die elektrolytische Dissoziation eignet sich Kupferchlorid ($CuCl_2$). Dieses Salz hat eine grüne Farbe, ebenso eine konzentrierte Lösung. In einer solchen befinden sich nur wenige (relativ) Ionen des Kupfers, die blau gefärbt sind, so dass die grüne Farbe der Kupferchloridmoleküle stark überwiegt. Setzt man zu der Lösung destilliertes Wasser, so dissoziieren sich immer mehr $CuCl_2$-Moleküle, und es erscheint bei einem gewissen Grade der Verdünnung die blaue Farbe der Kupferionen.

Alle Metallionen sind positiv elektrisch, da sie von der negativen Elektrode angezogen werden, ebenso das Wasserstoffion ($\overset{+}{H}$). Negative Ionen sind das Sauerstoffion, das Hydroxylion, die den Radikalen entsprechenden Ionen. Die Ladung des Wasserstoffions ist gleich dem Elementarquantum der Elektrizität (Elektron). Nach der Anzahl der an die

Materie eines Ions gefesselten Elementarquanten unterscheidet man zwischen einwertigen, zweiwertigen etc. Ionen.

3. **Stromleitung in Elektrolyten, Elektrolyse.** Während die Leiter erster Klasse (s. S. 48) die Elektrizität leiten, ohne dass die Materie des Leiters eine Änderung (im chemischen Sinne) erleidet oder sich fortbewegt, beobachten wir bei den Elektrolyten bei Stromdurchgang stoffliche Veränderungen und einen Transport der Materie. Die Vorgänge bei der Elektrolyse sollen in Kürze für einen speziellen Fall beschrieben werden. Der Elektrolyt sei verdünnte Salzsäure (HCl + aqua). Die Doppelkreise in Fig. 126 entsprechen den nicht dissoziierten (neutralen) Molekülen HCl, die schwarzen Kreise den Wasserstoffionen, die weissen den Chlorionen. Tauchen wir in den Elektrolyten zwei Kohlenelektroden ein, und verbinden wir diese mit einer Stromquelle (von genügend hoher elektromotorischer Kraft), so wird die eine Elektrode positiv, die andere negativ geladen. Die positive Elektrode, die Anode, stösst die $\overset{+}{H}$-Ionen ab. Diese wandern also sämtlich (mit sehr geringer Geschwindigkeit wegen des relativ sehr grossen Reibungswiderstandes) nach der negativen Elektrode hin. Zu der abstossenden Kraft der Anode kommt noch die Anziehung seitens der negativen Elektrode, der Kathode, hinzu. Die elektronegativen Chlorionen werden von der Anode angezogen und von der Kathode abgestossen, wandern also in entgegengesetzter Richtung wie die $\overset{+}{H}$-Ionen.


Fig. 126.

Die fortschreitende Bewegung der Ionen bezeichnet man als die Wanderung der Ionen. Die an der negativen Elektrode ankommenden $\overset{+}{H}$-Ionen geben an diese ihre Ladung ab und gehen in den atomistischen Zustand über, sie werden entionisiert. Je zwei H-Atome vereinigen sich zu einem Molekül, die Moleküle bilden Bläschen, und diese entweichen

(sichtbare Elektrolyse). Entsprechendes gilt für die Chlorionen. Wir erhalten also als Produkte der Elektrolyse Wasserstoff und Chlor. Dasjenige Ion, das nach der Anode hinwandert, an dieser also frei wird, nennt man das **Anion**, das nach der Kathode wandernde das **Kation**.

Nach dieser Anschauung fliesst die von der Stromquelle gelieferte Elektrizität nicht durch den Elektrolyten hindurch. Diese Elektrizität wird an der Oberfläche der Elektroden für die Entionisierung der ankommenden Ionen verbraucht. Das, was man als einen elektrischen Strom in einem Elektrolyt bezeichnet, ist die Bewegung der an die Materie gebundenen positiven bezw. negativen Ladungen der Ionen.

Der Leitungswiderstand eines Elektrolyts ist also ein Reibungswiderstand im wahren Sinne des Wortes. Durch die Reibung zwischen den wandernden Ionen und den Molekülen des Lösungsmittels bezw. der nicht dissoziierten Moleküle wird Wärme erzeugt. Diese ist wie in einem metallischen Leiter pro Sek. gleich $0{,}24 \cdot w \cdot J^2 \cdot cal$, wenn w der wirkliche Widerstand des Elektrolyts und J die Stromstärke ist.

Die **Leitfähigkeit** der Elektrolyte, zu denen, wie hier bemerkt sei, auch die geschmolzenen Salze, Basen, flüssiges bezw. weiches Glas etc. gehören, ist im Vergleich zu jener der Metalle eine sehr geringe. Eine 30 %ige Lösung von $CuSO_4$ (Kupfersulfat) z. B. leitet den elektrischen Strom ca. 800000 Mal schlechter als Kupfer; der elektrische Strom findet nämlich in einem Faden von 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt aus dieser Lösung einen Widerstand von etwa 14000 Ohm.

Wenn trotzdem der Widerstand eines grösseren galvanischen Elementes nur Bruchteile eines Ohms beträgt, so liegt das daran, dass die Länge der Flüssigkeitsschicht zwischen dem Elektroden (Abstand der Elektroden) klein und der Querschnitt viele Tausende Quadratmillimeter beträgt.

Neuerdings bezieht man die Angaben über den spezifischen Widerstand der Elektrolyte bezw. über deren Leitfähigkeit auf eine Säule von 1 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt.

Der Widerstand der Elektrolyte ändert sich mit der Konzentration und der Temperatur. Erwärmt man einen Elektrolyt, z. B. $CuSO_4$-Lösung, während des Stromdurchganges,

so findet man, dass die Stromstärke wächst, dass also der spezifische Widerstand kleiner wird. Die Elektrolyte zeigen also in dieser Hinsicht gerade das entgegengesetzte Verhalten wie die Metalle. (Siehe den auf S. 53 beschriebenen Versuch.)

4. **Primäre und sekundäre Elektrolyse.** Als erstes Beispiel diene eine Lösung von Kupfersulfat. Die Dissoziation geht nach der Gleichung vor sich:

$$CuSO_4 = \overset{++}{Cu} + \overset{=}{SO_4}.$$

Wählt man als Elektroden zwei Platinbleche oder zwei Kohlenplatten (oder -Stäbchen, z. B. Bogenlampenkohlen), allgemein zwei indifferente Elektroden, so schlägt sich auf der einen Elektrode Kupfer nieder, an der anderen entweicht Sauerstoff. Dieser entsteht sekundär (durch „sekundäre Elektrolyse"), indem die $\overset{=}{SO_4}$-Ionen nach Abgabe ihrer Ladung sich mit Wasser verbinden nach der Gleichung:

$$H_2O + SO_4 = H_2SO_4 + O; \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

der Elektrolyt wird also ärmer an $CuSO_4$ und wird sauer.

Ersetzt man die indifferente Anode durch eine Kupferplatte, so bildet sich (wenn die Stromdichte nicht gar zu gross genommen wird) an dieser kein Sauerstoff, man erhält vielmehr sekundär ein neues Molekül $CuSO_4$ nach der Gleichung:

$$Cu + SO_4 = CuSO_4; \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

der Kupfergehalt der Lösung bleibt also unverändert.

Werden zwei Platinelektroden benutzt, und ändert man, nachdem sich auf der negativen Elektrode ein Kupferhäutchen gebildet hat, die Stromrichtung, so erfolgt an dieser Elektrode erst dann Gasbildung, wenn der Kupferniederschlag verschwunden ist.

Es können sich nun auch an beiden Elektroden sekundäre Prozesse abspielen. Wird z. B. eine Natriumsulfatlösung (Na_2SO_4) zwischen indifferenten Elektroden (Platin) zersetzt, so verbindet sich das an der Kathode abgeschiedene Natrium mit Wasser nach der Gleichung:

$$Na + H_2O = NaOH + H,$$

während sich an der Anode SO_4 mit Wasser verbindet. An der Kathode wird also die Flüssigkeit alkalisch, an der Anode wird sie sauer, und es entweichen H und O (s. auch S. 264).

Für einen Versuch benutzt man den in Fig. 127 abgebildeten Apparat. Die U-förmige Röhre, in deren Schenkel an dünnen Drähten befestigte Elektroden aus Platin hineinragen, wird mit einer wässerigen Lösung von Na_2SO_4 gefüllt, die man durch Lackmustinktur schwach blau gefärbt hat. Schickt man einige Zeit einen Strom von etwa $^1/_5$ Amp. durch den Apparat, so findet man, dass sich die Flüssigkeit in dem einen Schenkel rot färbt, und dass sie in dem andern Schenkel intensiv blau wird. Kehrt man die Stromrichtung um, so verschwinden die Farbenunterschiede.



Fig. 127.

5. **Die Faradayschen Gesetze.** Faraday stellte auf Grund seiner experimentellen Untersuchungen zwei äusserst wichtige Gesetze über die Elektrolyse auf. Obschon sich diese aus den modernen Anschauungen ganz von selbst ergeben, sollen sie doch kurz besprochen werden. Berücksichtigt man, dass die positive und negative Elektrizität, die von der Stromquelle abgegeben wird, für die Entionisierung der Ionen verbraucht wird, so sieht man ohne weiteres ein, dass die an einer Elektrode abgeschiedene Menge der von der Stromquelle gelieferten bezw. durch den Elektrolyten hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge proportional ist (erstes Faradaysches Gesetz).

Um zu dem zweiten Gesetze zu gelangen, wählen wir zunächst als Beispiel die Zersetzung der verdünnten Salzsäure (HCl). An der negativen Elektrode wird H abgeschieden. Beträgt die Stromstärke 1 Amp., so erhält man pro Sekunde 0,0104 mg H. Um also 1 Grammäquivalent[1]) H, d. h. 1 g (ge-

1) Dividiert man das Atomgewicht eines Elementes durch seine Wertigkeit, so erhält man das Äquivalentgewicht. Ein Grammäquivalent ist soviel Gramm, wie das Äquivalentgewicht angibt. Beispiele: 1) Aus der Formel HCl schliessen wir, dass das Chlor einwertig ist; mithin ist 1 Grammäquivalent Cl gleich 35,4 g Cl. 2) Die Formel für Wasser lautet $H_2O = H-O-H$; der Sauerstoff ist also zweiwertig, sein Atomgewicht ist 16, das Äquivalentgewicht also 8. 3) Aus der Formel H_2SO_4 schliessen

nauer 1,008 g) H, zu erhalten, muss die Elektrolyse bei 1 Amp. Stromstärke im ganzen $\frac{1008}{0,0104} = 96\,540$ Sekunden lang dauern, oder es müssen 96 540 Coulomb durch den Zersetzungsapparat fliessen. Die genannte Elektrizitätsmenge bezeichnet man mit 1 F (Faraday zu Ehren). Ausser Wasserstoff erhält man Chlor, und zwar werden gerade soviel Atome Chlor abgeschieden wie Wasserstoffatome. Da nun 1 Atom Chlor 35,4 mal schwerer ist als 1 Atom H, so werden durch 1 F gerade 35,4 g, d. h. es wird 1 Grammäquivalent Chlor in Freiheit gesetzt.

Der Elektrolyt sei jetzt eine Lösung von Kupferchlorid ($CuCl_2 = \overset{++}{Cu} + \overset{-}{Cl} + \overset{-}{Cl}$). Schicken wir wieder 96540 Coulomb durch die Zersetzungszelle, so erhalten wir auch jetzt 35,4 g Chlor. Diese Menge möge n-Atome Chlor enthalten. Da 1 $\overset{++}{Cu}$-Ion mit einer doppelt so grossen Elektrizitätsmenge (entgegengesetzten Vorzeichens) beladen ist wie 1 $\overset{-}{Cl}$-Ion, so werden nicht n, sondern $\frac{n}{2}$ Atome Kupfer abgeschieden, d. h. auf 35,4 g Cl kommen $\frac{63,6}{2}$ g Cu. Dieses ist aber das Äquivalentgewicht des Kupfers in den Kupriverbindungen, zu denen das $CuCl_2$ gehört.

In der Verbindung CuCl (Kupferchlorür, Kuprochlorid) ist das Cu einwertig. 1 Grammäquivalent Cu ist also jetzt gleich $\frac{63,6}{1}$ g Cu. Die Anzahl der abgeschiedenen Kupferatome ist gerade so gross wie diejenige der frei gewordenen Chloratome. Es werden also durch 96 540 Coulomb 63,6 g Cu in Freiheit gesetzt.

Ist der Elektrolyt H_2SO_4 + aq., so behandelt man das Radikal SO_4 wie ein Atom eines Elementes, dessen Atomgewicht gleich $32 + 4 . 16 = 96$ und dessen Wertigkeit, da es 2 Atome H bindet, gleich 2 ist. Da man statt jedes entionisierten $\overset{=}{SO_4}$-Ions 1 Atom Sauerstoff erhält (s. Gleichg. S. 213),

---

wir, dass die Gruppe SO_4 sich wie ein zweiwertiges Element verhält. In der Verbindung $CuSO_4$ ist also auch das Kupfer zweiwertig.

so darf man so schliessen, als ob das Wasser direkt zersetzt würde und dieses nach der Gleichung $H_2O = \overset{+}{H} + \overset{+}{H} + \overset{=}{O}$ dissoziiert wäre. Analoges gilt für $AgNO_3$, $CuSO_4$ etc.

Schaltet man also eine Reihe von Zersetzungszellen, in denen sich verschiedene Elektrolyte befinden, hintereinander, so werden in allen äquivalente Mengen der Bestandteile der Elektrolyte abgeschieden (zweites Faradaysches Gesetz).

Mit Hülfe des Faradayschen Gesetzes kann man leicht berechnen, wie viel Gramm eines Elektrolyts durch einen Strom von gegebener Stärke in einer bestimmten Zeit zersetzt werden. Beispiel: Wie viel Gramm Cu werden aus Kupfersulfatlösung ($CuSO_4$) durch einen Strom von 50 Amp. in 1 Stunde abgeschieden? Es fliessen $50 . 3600 = 180000$ Coulomb durch den Apparat. Durch 96 540 Coulomb werden $\frac{63,6}{2}$ g Cu abgeschieden etc.

Über scheinbare Abweichungen vom Faradayschen Gesetze siehe S. 226.

6. **Umkehrbare und nichtumkehrbare Elemente.** Zu den umkehrbaren oder reversibel arbeitenden Elementen gehört das Daniell-Element (s. S. 231). Gibt das Element Strom ab, so geht Zink in Lösung, und Kupfer schlägt sich auf dem Kupferpole nieder. Den stromliefernden Prozess kann man also durch die Gleichung darstellen:

$$Zn + CuSO_4 = ZnSO_4 + Cu \quad . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Die elektromotorische Kraft des Elementes beträgt etwa 1,1 Volt.

Hat die Kette 96 540 Coulomb abgegeben, so hat sie eine Arbeit von 96 540 . 1,1 Watt geleistet. Wir denken uns nun, dass ein sehr grosses Element, dessen inneren Widerstand wir gleich Null setzen können, die angegebene Elektrizitätsmenge abgegeben hat, und dass man ihm dann aus irgend einer fremden Stromquelle (z. B. aus einer Thermosäule) Elektrizität zuführt, dass also der fremde Strom das Element in umgekehrter Richtung durchfliesst wie der eigene. Die Stromzufuhr werde als Ladung bezeichnet. Jetzt wird, wie man experimentell nachweisen kann, Zink abgeschieden und

Kupfer gelöst ($CuSO_4$ gebildet); die im Elemente sich abspielenden Vorgänge können durch die Gleichung

$$ZnSO_4 + Cu = CuSO_4 + Zn$$

veranschaulicht werden. Die Umkehrbarkeit tritt schon zutage; denn die letzte Gleichung ist die Umkehrung der vorletzten. Wir können beide Gleichungen zusammenfassen zu der folgenden:

$$CuSO_4 + Zn \rightleftarrows ZnSO_4 + Cu \quad . . . . (4)$$

Die Vorgänge bei der Entladung (Stromabgabe seitens des Elementes) erhält man also, wenn man vorstehende Gleichung von links nach rechts liest; der Ladung entspricht der untere Pfeil.

Bei der Ladung müssen wir eine elektromotorische Kraft anwenden, die nur um einen sehr kleinen Betrag grösser ist als 1,1 Volt; praktisch können wir die Ladespannung zu 1,1 Volt annehmen. Soll während der Stromzufuhr gerade so viel Kupfer in Lösung gehen, wie sich bei der Stromentnahme niedergeschlagen hat (nämlich 1 Grammäquivalent), so müssen wir in das Element dieselbe Elektrizitätsmenge hineinschicken, wie wir ihm entnommen haben, also 96 540 Coulomb. Ist dieses geschehen, so ist das Element wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt; hierzu bedarf es einer elektrischen Energie von 96 540 . 1,1 Watt.

Der Nutzeffekt (Wirkungsgrad bei Maschinen, Elektromotoren) ist also theoretisch gleich 100 %. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse etwas anders, weil sowohl bei der Entladung wie bei der Ladung der innere Widerstand, der selbst bei grossen Elementen nicht vernachlässigt werden darf, überwunden werden muss. Infolgedessen ist bei der Entladung die zur Verfügung stehende Spannung, die Klemmenspannung, kleiner als 1,1 Volt, während die bei der Ladung aufzuwendende elektromotorische Kraft grösser als 1,1 Volt ist.

Bei der Stromentnahme geht Zink (Zn) in den Ionenzustand ($\overset{++}{Zn}$) über und Kupfer aus dem Ionenzustand ($\overset{++}{Cu}$) in den atomistischen Zustand (Cu). Beide Vorgänge sind reversibel. Elektrolysiert man z. B. $CuSO_4$ zwischen Platinelektroden, so schlägt sich auf der negativen Elektrode Kupfer nieder:

$$\overset{++}{Cu} + 2\ominus = Cu \text{ oder } \overset{++}{Cu} = Cu + 2\oplus;$$

kehrt man die Stromrichtung um, so geht an derselben Elektrode Cu in Lösung:

$$Cu + 2\oplus = \overset{++}{Cu}.$$

Aluminium kann man mittels des Stromes in wässeriger Lösung in den Ionenzustand überführen. Kehrt man den Strom um, so erhält man nicht Aluminium zurück, sondern es wird Wasserstoff (statt Al) abgeschieden. Der erstere Vorgang ist also nicht reversibel.

Die vorigen Betrachtungen lassen sich nicht auf die Voltasche Kette, Zink und Kupfer in verdünnter Schwefelsäure, übertragen. Wird diesem Elemente Strom entnommen, so geht Zink unter Bildung von Zinksulfat in Lösung (geht in den Ionenzustand über), und Wasserstoff wird an der Kupferplatte frei. Der stromliefernde Prozess kann demnach durch die Gleichung dargestellt werden:

$$Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2.$$

Bei der Ladung wird kein Zink zurückgebildet; es bildet sich vielmehr Kupfersulfat (Kupfer geht in den Ionenzustand über), und es wird auch jetzt Wasserstoff frei:

$$Cu + H_2SO_4 = CuSO_4 + H_2.$$

Man kann also das Element durch einen Ladungsprozess nicht wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzen, das Element ist ein nichtumkehrbares.

7. **Elektromotorische Kraft und Wärmetönung.** In einem galvanischen Elemente entsteht die elektrische Energie, die das Element abgibt, aus chemischer Energie. Es fragt sich nun, welche Beziehung zwischen den beiden Energieformen besteht. Wir betrachten wieder einen speziellen Fall, nämlich das Daniell-Element. Wie wir gesehen haben, kann man die im Elemente sich abspielenden Vorgänge durch die Gleichung 3 (S. 216) darstellen. Der durch diese Gleichung veranschaulichte Vorgang ist mit Wärmeentwickelung verbunden.

Um dies nachzuweisen, bringt man in eine Flasche Zinkspäne, giesst auf diese Kupfersulfat und verschliesst die Flasche durch einen Gummistopfen, durch den eine S-förmig gebogene Röhre hindurchgeht. In der Röhre befindet sich gefärbtes Wasser; durch die entwickelte Wärme wird die abgeschlossene Luft erwärmt etc.

Das Element möge 96540 Coulomb abgegeben haben; es hat sich dann 1 Grammäquivalent (s. S. 214) Zink gelöst und 1 Grammäquivalent Kupfer sich niedergeschlagen. Die dem ganzen chemischen Umsatze entsprechende Wärmemenge, die man die Wärmetönung des Elementes nennt, werde mit w bezeichnet. Man nahm früher an, dass die elektromotorische Kraft eines galvanischen Elementes durch die Wärmetönung allein bestimmt sei. Bezeichnen wir die dieser Annahme entsprechende elektromotorische Kraft mit E, so besteht die Beziehung

$$96540 . E \text{ Watt äquivalent } w \text{ cal.}$$

oder, da 1 Watt gleichwertig 0,237 cal.,

$$96540 . 0,237 . E = w \text{ oder}$$

$$E = \frac{w}{23070}.$$

Diese Gleichung nennt man die Thomsonsche Regel. Sie liefert, auf das Daniell-Element angewandt, einen mit der Wirklichkeit gut übereinstimmenden Wert. Bei anderen Elementen findet man aber einen (manchmal beträchtlichen) Unterschied zwischen der berechneten und der gemessenen elektromotorischen Kraft; ganz versagt die Thomsonsche Regel bei den Konzentrationsketten.

Thomson ging von der Voraussetzung aus, dass die ganze dem chemischen Umsatze entsprechende Energie bezw. nur diese in elektrische Energie umgewandelt werde, dass sich also das Element während der Stromabgabe weder erwärme noch abkühle [1]). Diese Voraussetzung trifft aber im allgemeinen nicht zu, wie durch experimentelle Untersuchungen von Braun, Raoult u. a. nachgewiesen wurde.

Durch Anwendung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie auf die galvanischen Elemente gelangte Helmholtz zu der Gleichung

---

1) Von der Jouleschen Wärme ist hier abgesehen; wir nehmen also wieder an, dass der innere Widerstand des Elementes dadurch, dass man sehr grosse Elektroden benutzt, die einen kleinen Abstand haben, verschwindend klein gemacht ist.

$$E = \frac{w}{23070} + c.T.$$

w ist hier die Wärmetönung in dem oben angegebenen Sinne, T die absolute Temperatur und c der Temperaturkoeffizient. Dieser gibt an, um wie viel Volt sich die elektromotorische Kraft eines Elementes ändert, wenn die Temperatur der Substanzen, aus denen es zusammengesetzt ist, um 1° Cels. steigt.

Bei dem Bleiakkumulator findet man durch Messungen, dass seine elektromotorische Kraft bei der üblichen Säuredichte um etwa 0,0004 Volt pro 1° Temperaturerhöhung steigt. Bei 17° Cels. hat also das Glied c.T den Wert (273 + 17).0,0004 = 0,116. Um so viel Volt ist also die elektromotorische Kraft höher, als sie nach der Thomsonschen Regel sein müsste.

Die Abhängigkeit der elektromotorischen Kraft von der Temperatur kann man in der Weise demonstrieren, dass man zwei Akkumulatoren, deren elektromotorische Kräfte einander gleich sind[1]), gegeneinander schaltet, d. h. die positiven Pole miteinander verbindet und ebenso die negativen, und die eine Zelle in einem Wasserbade erwärmt, die andere abkühlt. Hat man noch ein Galvanoskop (Millivoltmeter oder dgl.) eingeschaltet, so beobachtet man nach Verlauf von $^1/_2$ bis 1 Stunde einen Ausschlag.

Ist c positiv, steigt also die elektromotorische Kraft mit der Temperatur, so wird nicht nur die dem chemischen Umsatze entsprechende Energie (Wärmetönung) in elektrische Energie umgesetzt, sondern auch noch Wärme, die zunächst den Substanzen des Elementes und durch diese der Aussenwelt entzogen wird.

Nimmt bei Temperaturerhöhung die elektromotorische Kraft eines Elementes ab, so ist der Temperaturkoeffizient negativ. In diesem Falle liefert die Thomsonsche Regel einen zu hohen Wert für E, und das Element erwärmt sich während der Stromabgabe, indem ein Teil der Wärmetönung als Wärme zum Vorschein kommt.

Die Helmholtzsche Relation (auch die G i b b s - H e l m h o l t z s c h e F o r m e l genannt) g i l t n u r f ü r u m k e h r b a r e E l e m e n t e.

---

1) Haben die Zellen elektromotorische Kräfte, die etwas voneinander verschieden sind, so schaltet man sie gegeneinander und lässt sie 1—2 Tage stehen.

Wenn der Vorgang im Elemente nicht reversibel ist, so wird die chemische Energie nicht vollständig in elektrische umgewandelt; eine Berechnung der elektromotorischen Kraft ist dann nicht möglich.

Die Betrachtungen lassen sich leicht auf die Elektrolyse übertragen; denn während des Stromdurchganges verhält sich ein elektrolytischer Apparat wie ein galvanisches Element (s. Polarisation). Auch hier erhält man nur Näherungswerte für die Zersetzungsspannung, wenn man die Thomsonsche Regel anwendet.

„Beispielsweise gehört zur Elektrolyse der verdünnten Salzsäure eine elektromotorische Kraft von 1,3 Volt, während die Wärmetönung des chemischen Prozesses 39 310 cal. beträgt und sich somit E (Zersetzungsspannung) zu 1,71 Volt berechnet; dabei ist noch zu bemerken, dass w von der Konzentration der Säure unabhängig ist, nicht aber E.“ (Nernst, l. c., S. 649.)

8. **Die Nernstsche Theorie der Stromerzeugung.** Wie wir gesehen haben, löst sich eine ganze Reihe von Substanzen in Wasser, und wir haben das Bestreben eines Salzes etc., in den gelösten Zustand überzugehen als Lösungstension bezeichnet. Nach Nernst hat nun jedes Metall, das in Wasser oder in eine Lösung eingetaucht wird, das Bestreben sich zu lösen. Von anderen Substanzen unterscheiden sich die Metalle aber wesentlich dadurch, dass sie nicht anders als positiv geladen, d. h. in Gestalt positiver Ionen, in Lösung zu gehen imstande sind. Man bezeichnet daher ihre Lösungstension als elektrolytische. Befinden sich in der Lösung, in die man das Metall bringt, schon Ionen des betreffenden Metalles, so wirkt der osmotische Druck dieser Ionen der Lösungstension entgegen.

Wir haben also ähnliche Verhältnisse, wie wenn sich über einer Flüssigkeit Dampf der betreffenden Flüssigkeit befindet. Die Flüssigkeit hat das Bestreben, in Dampfform überzugehen (Verdampfungstension), und der Dampf hat die Tendenz, sich zu kondensieren. In einem abgeschlossenen Raume bildet sich bald ein Gleichgewichtszustand aus.

Zink hat eine ausserordentlich hohe Lösungstension, sie ist grösser als der höchste erreichbare osmotische Druck der

Zinkionen in einer Zinksalzlösung. Taucht man daher eine Zinkstange in Zinksulfatlösung ein, so treibt das Zink Ionen in die Lösung hinein, wie es durch Fig. 128 veranschaulicht wird.

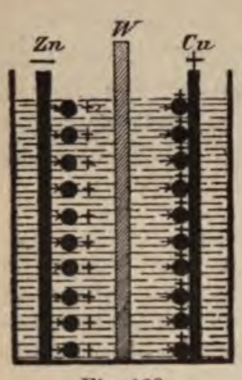


Fig. 128.

Infolgedessen wird die Flüssigkeit positiv und das Metall negativ elektrisch. Da sich ungleichnamige Elektrizitäten gegenseitig anziehen, so kommt zu dem osmotischen Drucke noch eine Kraft hinzu, die der Lösungstension entgegenwirkt. Die elektrostatische Anziehung erreicht wegen des ausserordentlich kleinen Abstandes der beiden Elektrizitäten, schon wenn ganz minimale Mengen Zink in Lösung gegangen sind, einen sehr hohen Wert. Noch ehe wägbare Mengen Zink in Lösung gegangen sind, hat sich ein Gleichgewichtszustand ausgebildet.

Dieser ist vorhanden, wenn die Lösungstension gleich ist der Summe aus dem osmotischen Drucke und der elektrostatischen Anziehung.

Man beachte, dass durch $\frac{65,4}{2}$ Gramm Zink, die in Lösung gehen, 96540 Coul. transportiert werden und dass 1 Coul. $= 3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten. Schon 1 Millionstel Milligramm Zink entspricht also eine Elektrizitätsmenge, die man, wenn es sich um ruhende Elektrizität handelt, als sehr gross bezeichnen würde.

Die elektrolytische Lösungstension des Kupfers ist sehr klein; sie ist kleiner als der osmotische Druck der Kupferionen in sehr stark verdünnter Kupfersulfatlösung. Wenn man also einen Kupferstab in Kupfersulfatlösung eintaucht, so gehen, getrieben durch den osmotischen Druck, Kupferionen aus der Lösung auf den Kupferstab; das Kupfer wird also positiv und die Flüssigkeit negativ elektrisch. Auch hier bildet sich sehr bald ein Gleichgewichtszustand aus.

Bei dem Daniell-Element, das in Figur 128 schematisch gezeichnet ist (*W* ist die poröse Scheidewand), hat also das Kupfer ein positives und das Zink ein negatives

Potential. Verbindet man nun die beiden Elektroden durch einen Draht miteinander, so fliesst positive Elektrizität von dem Kupfer- und negative von dem Zinkpole weg. Infolgedessen wird das Gleichgewicht an beiden Elektroden gestört, so dass neues Zink in Lösung gehen und neues Kupfer sich auf der positiven Elektrode niederschlagen kann. An der einen Elektrode werden also gleichsam positive Ionen in den Elektrolyten hinein-, an der anderen positive Ionen aus dem Elektrolyten herausgedrückt.

Taucht man ein Metall, z. B. Zink, in eine Lösung des betreffenden Metalls, z. B. in Zinksulfatlösung, und haben in dieser die Metallionen die Konzentration 1, d. h. befindet sich in 1 Liter der Lösung 1 Grammolekül Metallionen, so nennt man das Potential, welches das Metall annimmt, das elektrolytische Potential.

9. **Elektrolyse des Wassers, Polarisation, Gaselemente.** Wir wollen von einem bekannten Versuch ausgehen. Der in Figur 129 abgebildete Apparat (nach Hofmann) wird mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt. Verbindet man die Elektroden mit einer Stromquelle (mindestens zwei Akkumulatoren), so beobachtet man, dass in den betreffenden Schenkeln Gase emporsteigen. Diese sammeln sich oben, indem sie den Elektrolyten in den dritten Schenkel hineindrücken. Man kann leicht nachweisen, dass das eine Gas (über der negativen Elektrode) Wasserstoff, das andere Sauerstoff ist. Man erhält also als Produkte der Elektrolyse die Bestandteile des Wassers. Verbindet man die beiden Elektroden noch mit einem Voltmeter für kleine Spannungen, so findet man, dass unser elektrolytischer Apparat nach Abschaltung der Batterie einen Strom aussendet. Dieser Strom, der Polarisationsstrom, hat die entgegengesetzte Richtung (im Innern des Apparates)

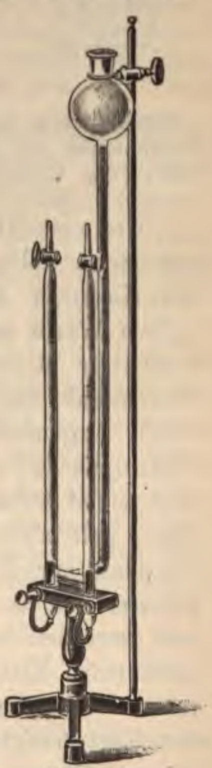


Fig. 129.

wie der Zersetzungsstrom, so dass die ihm entsprechende elektromotorische Kraft passend als elektrolytische Gegenkraft bezeichnet wird. Natürlich ist diese Gegenkraft auch schon während der Elektrolyse vorhanden gewesen.

Um die Polarisation zu zeigen, kann man die in Figur 130 abgebildete Versuchsanordnung wählen. In dem Glase E befindet sich verdünnte Schwefelsäure. Als Elektroden kann man zwei Kohlenplatten benutzen, wie sie in Bunsen-Elementen Verwendung finden. A ist ein Amperemeter, W ein Kurbelrheostat, der zugleich als Stromschlüssel dient, B die Batterie und V ein Voltmeter. Statt eines Voltmeters kann man das im Kapitel „Messinstrumente" beschriebene Galvanoskop von Hartmann und Braun verwenden, dem man etwa 1000 Ohm Widerstand vorschaltet.

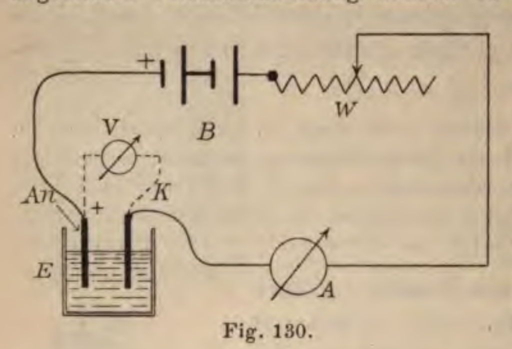


Fig. 130.

Um einen Einblick in das Wesen der Polarisation zu gewinnen, wollen wir annehmen, dass wir die Spannung an den Klemmen des elektrolytischen Apparates, von einem kleinen Werte anfangend, allmählich steigern. Dies kann am einfachsten dadurch erreicht werden, dass man bei einer Thermosäule die Anzahl der Gasflämmchen nach Bedarf vermehrt. Angenommen, wir beginnen mit 1 Volt. Ein mit dem elektrolytischen Apparate in Reihe geschaltetes Galvanoskop zeigt einen Strom an, wenn wir den Kreis schliessen. Der Zeiger geht aber in ganz kurzer Zeit fast auf den Nullpunkt der Skala zurück. Da etwas Elektrizität durch den Apparat geflossen ist, so müssen auch geringe Mengen von Gasen frei geworden sein; denn eine Bewegung der Elektrizität durch einen Elektrolyten ist immer mit einer Zersetzung verbunden. Die abgeschiedenen Gase werden von den Elektroden absorbiert (aufgenommen, gelöst). Nun bilden aber eine mit Wasserstoff und eine mit Sauerstoff beladene Elektrode aus

Platin in verdünnter Schwefelsäure ein galvanisches Element, die sogenannte Knallgaskette (s. unten). Die Elektroden verhalten sich wie zwei Metalle. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes hängt von der Dichtigkeit, dem Drucke der von den Elektroden aufgenommenen Gase ab. Der Zersetzungsstrom fliesst so lange durch den elektrolytischen Apparat, bis die elektromotorische Kraft der sich bildenden Knallgaskette (nahezu) 1 Volt beträgt. Wenn dieser Punkt erreicht ist, wird die elektromotorische Kraft der Stromquelle (der Thermosäule) kompensiert.

Ein ganz schwacher Strom fliesst dauernd durch den Apparat. Die von den Elektroden absorbierten Gase dringen langsam (diffundieren) in den Elektrolyten; infolgedessen sinkt die elektrolytische Gegenspannung etwas unter 1 Volt, und es kann wieder ein Strom durch die Flüssigkeit fliessen. Durch den dauernd vorhandenen kleinen Strom, den sogenannten Reststrom, werden die durch Diffusion bedingten Gasverluste (der Elektroden) gedeckt.

Geht man von 1 Volt zu 1,12 Volt Spannung über, so erhält man dauernd einen etwas stärkeren Strom, wenn man platinierte Platinelektroden benutzt [1]). Die elektromotorische Kraft der Knallgaskette beträgt nämlich bei 1 Atmosphäre Druck 1,12 Volt. Wahrscheinlich werden bei dieser Spannung dauernd die Ionen des Wassers (nicht diejenigen der Schwefelsäure) abgeschieden. Eine flotte Elektrolyse findet aber erst dann statt, wenn $\overset{=}{SO_4}$-Ionen der Schwefelsäure, die in grosser Anzahl vorhanden sind, entionisiert werden. Die hierzu erforderliche Spannung beträgt bei Platinelektroden mehr als 2 Volt.

Ein für Versuche geeignetes Gaselement ist in Fig. 131 (S. 226) abgebildet. In den beiden Röhren befinden sich platinierte Platinelektroden (Platin mit fein verteiltem Platinschwamm). Man füllt zunächst das Glas und die Röhren mit verdünnter Schwefelsäure und schickt einen Strom durch den Apparat, bis die Röhre, in der sich der Wasserstoff sammelt, fast ganz mit diesem Gase

---

1) Näheres siehe in den angegebenen Werken von Arrhenius, von Le Blanc und von Nernst. Ferner sei auf das VI. Kapitel in dem Werkchen von H. Danneel verwiesen.

gefüllt ist. Das Element ist jetzt „geladen". Wenn man bei der Stromentnahme eine gewisse Stromstärke nicht überschreitet, so erhält man längere Zeit einen konstanten Strom, indem dann die Absorption der Gase seitens der Elektroden mit dem Verbrauch gleichen Schritt hält.



Fig. 131.

Führt man dem Elemente Strom zu, so beobachtet man, dass bei einer Spannung von mehr als 1,1 Volt sichtbare Gasentwickelung erfolgt.

Bei der Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure können sich verschiedene Nebenprodukte bilden, nämlich Ozon (O_3), Wasserstoffsuperoxyd (H_2O_2) und Überschwefelsäure ($H_2S_2O_8$). Dies gilt besonders, wenn die Konzentration der Säure eine hohe und die Temperatur eine niedrige ist. Da für die Bildung der Nebenprodukte ebenfalls Strom verbraucht wird, so ist die Gasausbeute kleiner als sie dem Faradayschen Gesetze gemäß sein müsste.

Für einen Versuch benutze man den in Fig. 129 abgebildeten Apparat, den man mit stark konzentrierter Schwefelsäurelösung (spezif. Gew. 1,5—1,6) füllt. Den unteren Teil der Röhren lässt man in kaltes Wasser eintauchen, um eine Erwärmung des Elektrolyts durch Stromwärme zu verhindern. Man findet, dass das Volumen des abgeschiedenen Sauerstoffs kaum $^1/_4$ desjenigen des Wasserstoffs ist.

In unserem Beispiele wird die Polarisation durch Gase verursacht, die von den Elektroden absorbiert werden. In anderen Fällen ist es das an der Kathode abgeschiedene Metall, das die Entstehung einer elektrolytischen Gegenspannung verursacht. Elektrolysieren wir z. B. $ZnSO_4$-lösung zwischen Platinelektroden, so bildet sich in kurzer Zeit auf der Kathode eine dünne Schicht von Zink. Das abgeschiedene Metall hat das Bestreben, in den Ionenzustand zurückzukehren (s. elektrolytische Lösungstension). Diesem Bestreben entspricht eine gewisse Spannung, die den zersetzenden Strom bekämpft.

Wählen wir als Elektroden zwei Zinkplatten, so wird zunächst an der positiven Elektrode die Gasbildung verhindert,

indem sich nämlich SO_4 mit Zn verbindet. Da also an der Anode eine Polarisation nicht zustande kommen kann, so ist sie unpolarisierbar. Das Zink hat ferner an beiden Elektroden das Bestreben, in den Ionenzustand überzugehen; wir haben also zwei im entgegengesetzten Sinne wirkende Kräfte; diese heben sich gegenseitig auf. Schlägt sich auf der Kathode Zink nieder, so wird dadurch nichts geändert.

Wenn man die Gaspolarisation verhindern will, so muss man eine Elektrode wählen, die sich mit dem abgeschiedenen Gase chemisch verbindet, oder man muss die Elektrode mit einer festen oder flüssigen Substanz umgeben, welche das Gas gleichsam wegfängt. Die Sauerstoffpolarisation kann man z. B. durch Ferrochlorid $FeCl_2$ verhindern, indem dieses Salz durch Sauerstoff zu einem Ferrisalze oxydiert wird. Man nennt derartige Stoffe Depolarisatoren (s. auch S. 235).

Selbstverständlich gilt, wenn Polarisation stattfindet, das Ohmsche Gesetz in der einfachen Gestalt $E = i . w$ nicht mehr, sondern es ist, wenn ε die Polarisationsspannung bedeutet,

$$E - \varepsilon = i w.$$

10. **Ungleiche Wanderungsgeschwindigkeit der beiden Ionenarten, Konzentrationspolarisation, Konzentrationsketten.** Die beiden Ionenarten eines Elektrolyts bewegen sich bei der Elektrolyse nicht mit gleicher Geschwindigkeit durch die Flüssigkeit hindurch. Infolgedessen kommt es, wie Hittorf nachgewiesen hat, zu Konzentrationsänderungen an den beiden Elektroden. Der Elektrolyt sei Kupfersulfatlösung; diese werde zwischen Kupferelektroden zersetzt. Ein Verbrauch von $CuSO_4$ findet nicht statt, indem ja das an der Kathode abgeschiedene Kupfer an der Anode in Lösung geht. Nennt man die Konzentration vor der Elektrolyse c, so ist sie nach der Elektrolyse, wenn man gründlich umrührt, überall wieder c; unterlässt man aber das Umrühren (Schütteln oder dergl.), so ist die Konzentration in der Umgebung der einen Elektrode grösser und in der Nähe der anderen kleiner als c. Würden beide Ionenarten gleich schnell wandern, so könnte es zu Konzentrationsunterschieden infolge der Elektrolyse nicht kommen.

Die Konzentrationsänderungen an den Elektroden kann man experimentell nachweisen. An zwei dicke Kupferdrähte (Fig. 132) sind Kupferelektroden gelötet. Die Drähte gehen durch zwei Korke K hindurch. Man füllt den Apparat mit Kupfersulfatlösung, der man, um die Leitfähigkeit zu verbessern, einige Tropfen Salpetersäure zusetzt. Die obere Elektrode macht man zur Kathode und elektrolysiert mit relativ schwachem Strome. Nach 20—30 Minuten sieht man, dass die Konzentration des Elektrolyts in der unteren Hälfte der Röhre grösser und in der oberen Hälfte kleiner geworden ist. Man kann aber die Konzentrationsänderungen auch indirekt nachweisen. Zu dem Zwecke verbindet man die Klemmen des Apparates, nachdem der Zersetzungsstrom ausgeschaltet ist, mit einem Galvanoskop. Man findet, dass unser elektrolytischer Apparat einen Strom aussendet, der dem früheren Zersetzungsstrome entgegengesetzt gerichtet ist. Wir haben also hier eine andere Art der Polarisation wie die früher beschriebene, man nennt sie Konzentrationspolarisation. Das Element, in das sich der elektrolytische Apparat bei Stromdurchgang verwandelt, gehört zu den Konzentrationsketten.

Fig. 132.

Die Konzentrationsketten sind dadurch charakterisiert, dass zweimal dasselbe Metall in denselben Elektrolyt (Lösung eines Salzes des betreffenden Metalles) eintaucht, dass jedoch die eine Elektrode von einer starken, die andere von einer schwachen Lösung umgeben ist. Giesst man z. B. in die Röhre der Fig. 132 etwa bis zur Hälfte stark konzentrierte Kupferchloridlösung, und schichtet man darüber schwache Kupferchloridlösung, so erhält man eine Konzentrationskette. In der verdünnten Lösung geht Kupfer in Lösung, die entsprechende Elektrode entspricht also dem Zinkpol des Daniell-Elementes, sie wird negativ elektrisch; an der anderen Elektrode schlägt sich Kupfer nieder, sie wird positiv elektrisch. Der Strom fliesst also in dem Elemente von der verdünnten Lösung nach der konzentrierten.

Statt die Lösungen verschiedener Konzentration übereinander zu schichten, kann man die eine Lösung in ein Batterieglas und die andere in eine poröse Tonzelle giessen, die in dem Glase steht. Als Elektroden benutzt man zwei Kupferstäbe oder blanke, dicke Kupferdrähte.

Auch an der Berührungsstelle der beiden Lösungen entsteht eine Potentialdifferenz. Die gelöste Substanz hat nämlich das Bestreben, den Konzentrationsunterschied auszugleichen (Diffusion); es wandern also $\overset{++}{Cu}$- und $\overset{=}{SO_4}$-Ionen aus der konzentrierteren Lösung in die verdünntere. Da die erstere Ionenart langsamer wandert als die letztere, so wird der Elektrolyt auf der einen Seite der Trennungsfläche positiv und auf der anderen negativ elektrisch. Im allgemeinen sind die betreffenden Potentialdifferenzen klein.

Ein eigentümliches Verhalten zeigt das Aluminium, wenn es bei einem elektrolytischen Apparate Anode ist. Taucht man eine Aluminiumelektrode als Anode, eine Platin- oder Bleielektrode als Kathode in verdünnte Schwefelsäure oder in eine Lösung der Sulfate der Alkalien, so fliesst bei (Verwendung von Gleichstrom) nur eine geringe Elektrizitätsmenge durch den elektrolytischen Apparat, wenn die Spannung einen gewissen Betrag nicht überschreitet (etwa 22 Volt). Kehrt man die Stromrichtung um, so genügt eine Spannung von 2—3 Volt, um dauernd einen kräftigen Strom zu erhalten. Ist das Aluminium Anode, so bildet sich bei Stromdurchgang auf seiner Oberfläche eine dünne Oxydhaut, welche einen so grossen Widerstand hat, dass der Durchgang des Stromes beinahe ganz verhindert wird. Graetz hat auf Grund dieser Beobachtung einen Gleichrichter konstruiert. Schickt man Wechselstrom durch den beschriebenen elektrolytischen Apparat, so fliesst ein stärkerer Strom nur dann durch die Zelle, wenn der Strom vom Platin (Blei) zum Aluminium geht.

Geschichte der Elektrochemie. Die jetzt allgemein angenommenen Fachausdrücke, die sich auf die Elektrolyse beziehen, hat Faraday eingeführt. Die nach ihm benannten Gesetze wurden im Jahre 1833 aufgestellt. — Grotthus nahm an (1808), dass die Anode den an ihrer Oberfläche liegenden Molekülen des Elektrolyts (z. B. HCl) das Anion (Cl) entreisse, dass dann die freigewordenen Kationen den folgenden Molekülen ihre Anionen entziehen etc., so dass an der Kathode freie Kationen auftreten, die abgeschieden werden. Grove wies zuerst auf die Unrichtigkeit dieser Anschauung hin und sprach die Vermutung aus, dass die Moleküle schon vor der Abscheidung zersetzt seien. Clausius stellte die Theorie auf, dass in den Elektrolyten fortwährender Zerfall der Moleküle in positiv und negativ geladene „Teilmoleküle“ (Ionen) und Wiedervereinigung der Teilmoleküle stattfinde. Die Konsequenzen aus dieser Theorie wurden aber erst 30 Jahre später gezogen. — Ausführliche und umfangreiche Arbeiten von F. Kohlrausch und seiner Schüler in den Jahren

1869—1879 führten ihn schliesslich zur Aufstellung seines berühmten Gesetzes über die unabhängige Wanderung der Ionen. Es besagt, dass jedem Ion eine ganz bestimmte Wanderungsgeschwindigkeit und daher auch ein ganz bestimmter Anteil an der Stromleitung (ein ganz bestimmtes Leitvermögen) zukommt, gleichgültig, aus welchem Elektrolyt es stammt. Das Kalium-Ion z. B. bewegt sich unter sonst gleichen Umständen in einer Kaliumnitratlösung so schnell, wie in einer Chlorkaliumlösung. Addiert man zu der Leitfähigkeit des Kalium-Ions diejenige des Chlor-Ions, so erhält man die Leitfähigkeit des KCl.

Der Begründer der modernen Lösungstheorie ist van't Hoff; er zeigte, dass man auf Lösungen die Gasgesetze anwenden könne (s. osmotischer Druck). — Ausgehend von den Arbeiten Kohlrauschs und an Clausius anknüpfend arbeitete Arrhenius seine berühmte Dissoziationstheorie aus (1887). Er zog, um die Abweichungen der Elektrolyte von dem van't Hoffschen Gesetze zu erklären, den Schluss, dass ein ziemlich grosser Teil der Moleküle in elektrisch geladene Ionen dissoziiert sei; in äusserst verdünnten Lösungen sind alle Moleküle gespalten; bei konzentrierten Lösungen ist die Zahl der zerlegten Moleküle und die Zahl der unzerlegten Moleküle insofern im Gleichgewichte, als Zerfall und Neubildung in der Lösung stets dieselbe Grösse haben; der Gleichgewichtszustand ist von der Temperatur, der Konzentration und der Salzart abhängig. Elektrolytische Leitung und Dissoziation sind aufs Engste miteinander verknüpft, indem zur Elektrizitätsleitung nur die Ionen beitragen. Diese Theorie in Verbindung mit zahlreichen Arbeiten Ostwalds bildet das Fundament der heutigen Auffassung der Elektrolyse. — Im Jahre 1889 löste W. Nernst das vielumstrittene Problem der Stromerzeugung in galvanischen Elementen (s. S. 221).

Fünfzehntes Kapitel.

Anwendungen der Elektrochemie.

Die elektrochemische Praxis erstreckt sich auf die Herstellung der galvanischen Elemente, einschliesslich der Akkumulatoren und auf die Gewinnung von Produkten mittels des elektrischen Stromes, sei es dass die Elektrolyse, sei dass die Stromwärme zu diesem Zwecke Verwendung findet. Von den zahlreichen Anwendungen sollen in diesem Kapitel nur die wichtigsten aus dem Gebiete der anorganischen Chemie besprochen werden.

1. **Galvanische Elemente.** a) Das älteste galvanische Element ist die Voltasche Kette: Zink und Kupfer in verdünnter Schwefelsäure [1]). Die in ihm sich abspielenden Vorgänge sind schon beschrieben worden. Da die Kupferplatte sich mit Wasserstoff belädt (Wasserstoff absorbiert), so entsteht eine elektromotorische Gegenkraft, indem der absorbierte Wasserstoff in den Ionenzustand zurückzukehren sucht. Praktische Verwendung findet das Element nicht.

Elemente, die längere Zeit einen (nahezu) konstanten Strom liefern sollen, müssen so eingerichtet sein, dass entweder Gase nicht abgeschieden werden oder nicht an die positive Elektrode gelangen können, bezw. dort durch einen chemischen Prozess weggeschafft werden. (Depolarisatoren, s. S. 227.)

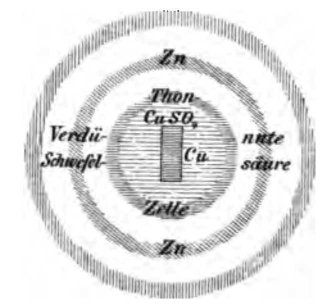


Fig. 133.

b) Das Daniellsche Element ist die älteste konstante Kette; sie wurde i. J. 1837 vom Engländer Daniell erfunden. Fig. 133 stellt einen Schnitt durch die Kette dar. Zink (amalgamiert) taucht in

1) Kurz geschrieben: Zn H_2SO_4 + aqua Cu.

verdünnte Schwefelsäure oder in Zinksulfatlösung, Kupfer in gesättigte Kupfervitriollösung. Die beiden Flüssigkeiten werden durch einen porösen Toncylinder, Diaphragma genannt, voneinander getrennt; diese gestattet dem Strome den Durchgang. — Die elektromotorische Kraft beträgt etwas mehr als 1 Volt; der innere Widerstand ist relativ gross.

Das Daniell-Element wurde von Meidinger vereinfacht — Weglassung der Tonzelle.

Eine Modifikation des Meidingerschen, bezw. Daniellschen Elementes ist das

c) Kupferelement, das in der Reichs-Telegraphenverwaltung in der ihm von Krüger gegebenen Form benutzt wird. Ein Zinkring *Z* (Figur 134) hängt am Rande des Batterieglases mittels dreier angegossener Nasen; die zweite Elektrode ist eine auf dem Boden liegende, an der Unterseite etwas gewölbte Bleiplatte *B*; in der Mitte derselben erhebt sich ein starker Bleidraht mit Anschlussklemme. Als Elektrolyt dient Zinksulfatlösung; dieser setzt man nach dem Einfüllen etwa 70 g Kupfervitriol in nussgrossen Stücken zu. Das $CuSO_4$ löst sich, und es wird nach einiger Zeit die Bleiplatte von einer blauen Flüssigkeit umhüllt. Wird dem Elemente, das anfänglich nur eine geringe elektromotorische Kraft hat, Strom entnommen, so schlägt sich auf der Bleiplatte Kupfer nieder.



Fig. 134.

Da die Kupferschicht immer dicker wird, so muss sie von Zeit zu Zeit entfernt werden. Um dies zu ermöglichen, versieht man die Bleiplatte vor dem Einsetzen mittels eines Pinsels mit einer dünnen Schicht von Schweinefett. — Die Konzentration der Zinksulfatlösung wird um so grösser, je länger das Element benutzt wird. Um die Lösung zu verdünnen, entfernt man mittels eines Hebers einen Teil der oben befindlichen Flüssigkeit und setzt Wasser zu[1]).

---

1) Näheres siehe: Handbuch der Elektrotechnik, 12ter Band, Telegraphie und Telephonie von Noebels, Schluckebier und Jentsch.

d) Normalelemente verwendet man in der Messtechnik als Vergleichsmaß für die Potentialdifferenz. Sie gehören zu den Elementen nach dem Daniell-Typus. Das Clark-Element hat folgende Zusammensetzung: In den Raum *A* des in Figur 135 abgebildeten Gefässes wird eine Mischung von 90 % Quecksilber und 10 % Zink eingefüllt; diese verhält sich in elektromotorischer Hinsicht wie reines Zink. Das bei höherer Temperatur flüssige

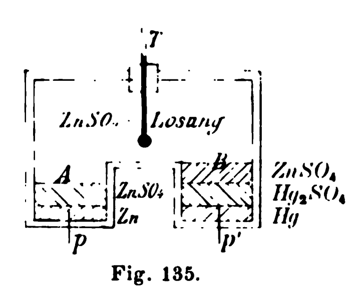


Fig. 135.

Amalgam erstarrt und schliesst den Platindraht *p* fest ein. (Dieser verhält sich indifferent.) In den anderen Schenkel giesst man um den Platindraht *p'* Quecksilber. Auf dieses schichtet man etwa 1 cm hoch eine Paste, die aus Zinksulfatkrystallen ($ZnSO_4 + 7 H_2O$), festem Merkurosulfat (Hg_2SO_4), Quecksilber und konzentrierter Zinksulfatlösung hergestellt wird. Die Paste und ebenso das Zinkamalgam in *A* wird mit einer Schicht von Zinksulfatkrystallen bedeckt. Hierauf wird das Element mit konzentrierter Zinksulfatlösung fast ganz angefüllt und durch einen Gummistopfen geschlossen, durch den ein Thermometer *T* hindurchgeht. Die elektromotorische Kraft beträgt bei 15° Cels. 1,438 Volt; sie nimmt pro 1° Temperaturerhöhung um etwa 0,0012 Volt ab. Verwendung findet das Element bei der Messung elektromotorischer Kräfte nach der Kompensationsmethode; es darf nur einen ganz schwachen Strom abgeben. Das Element wurde von Feussner modifiziert.

Das Westonelement zeichnet sich vor dem Clarkelement dadurch aus, dass seine elektromotorische Kraft in geringerem Maße von der Temperatur abhängig ist. Statt Zinkamalgam verwendet man Kadmiumamalgam.

e) Das Bunsen-Element, im Jahre 1841 von Bunsen erfunden, besteht aus amalgamiertem Zink in verdünnter Schwefelsäure und Retortenkohle in konzentrierter Salpetersäure. Die beiden Flüssigkeiten werden durch eine Tonzelle

getrennt. Die elektromotorische Kraft hat bei einer Salpetersäure von 52,4 % (spez. Gewicht 1,33) den hohen Wert von 1,87 Volt, der innere Widerstand beträgt bei mittelgrossen Elementen nur 0,1 bis 0,2 Ohm, so dass die Kette starke Ströme abgeben kann.

Solange die Salpetersäure noch reichlich vorhanden ist, verlaufen die Prozesse nach den Gleichungen:

$$HNO_3 + H_2O = HNO_2 + 2\,\overset{-}{OH}$$
$$2\,OH + 2\,\overset{+}{H} = 2\,H_2O.$$

Die Salpetersäure (Depolarisator) färbt sich durch die entstehende und sich zersetzende salpetrige Säure grün.

Je länger das Element Strom abgibt, um so mehr geht die elektromotorische Kraft zurück; denn um so geringer wird das Vermögen der Salpetersäure, den Wasserstoff zu oxydieren, um so mehr müssen sich die Wasserstoffionen an der Kohlenplatte entladen [1]. — Zu den Salpetersäureketten gehört auch das Element von Grove, bei dem statt Kohle Platin verwendet wird.

Amalgamieren des Zinks: 1. Nachdem die Zinkelektrode auf mechanischem Wege gereinigt ist, taucht man sie in verdünnte Salzsäure, trocknet sie, legt sie in eine Schale, in der sich etwas Quecksilber befindet; dieses verreibt man mit dem Handballen. 2. Man löse 200 g Quecksilber in der Hitze in einem Gemisch von 250 g Salpetersäure + 750 g Chlorwasserstoffsäure (Salzsäure) auf, füge der Lösung noch 1000 g Chlorwasserstoffsäure zu. Die Flüssigkeit bleibt lange Zeit brauchbar, wenn man sie in einer Flasche im Dunkeln aufbewahrt. Man taucht in die Lösung die gereinigte Zinkelektrode 10—20 Sekunden ein, spült sie mit Wasser ab und reibt sie mit einem Lappen trocken. (Nach Lüpke.)

c) Das Tauch- oder Chromsäureelement. Die als Depolarisator wirkende Chromsäure wird nach dem folgenden Rezept hergestellt: In eine gut glasierte irdene Schüssel gibt man 90 g doppeltchromsaures Kali, dazu giesst man 200 g Wasser, dann langsam unter Umrühren 90 cm³ Schwefelsäure. Nachdem sich das Salz gelöst hat, setze man noch 700 g Wasser zu und rühre fleissig um.

[1] Näheres siehe Lüpke, Grundzüge der Elektrochemie.

Als Elektroden dienen in der Regel zwei Kohlenplatten (s. Fig. 136) und eine Zinkplatte (in der Mitte). Da die Chromsäure das Zink stark angreift, so muss das Metall, wenn man das Element benutzt hat, aus der Säure entfernt werden. Die Zinkplatte wird daher an einem Messingstabe befestigt, der durch eine Hülse mit Schraube hindurchgeht, so dass man die Elektrode leicht festklemmen kann.


Fig. 136.

Die elektromotorische Kraft hat anfangs den Wert von 1,9 Volt, der innere Widerstand schwankt je nach den Dimensionen der Elektroden und der Dauer des Gebrauchs zwischen 0,1 und 1 Ohm.

g) Das Leclanché-Element findet ausgedehnte Verwendung zum Betriebe von Weckern (Telephonie) und bei elektrischen Klingeln (Haustelegraphen). Als Elektrolyt benutzt man Salmiak-(Chlorammonium-, NH_4Cl-) Lösung, als Elektroden Kohle und Zink; als Depolarisator dient Braunstein (Mangansuperoxyd, MnO_2). Bei dem in Figur 137 abgebildeten Elemente umgibt der Depolarisator in grobkörniger Form die Elektrode und wird durch eine Tonzelle zusammengehalten. Den Toncylinder lässt man meistens weg und legt auf die Kohle beiderseits eine aus einem Gemenge von Kohle und Braunstein nach Zusatz eines Bindemittels gepresste Platte; die drei Platten werden durch starke Gummibänder zusammengehalten. Statt dessen verwendet man sehr oft einen aus Kohle und Braunstein hergestellten Cylinder. In dieser Form findet das Element als sogenanntes „Kohlenelement“ bei der Reichs-Telegraphenverwaltung Verwendung.

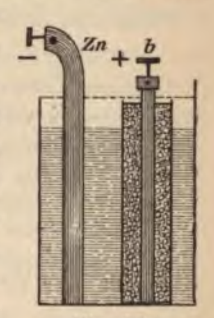


Fig. 137.

In der Mitte des Batterieglases steht der Braunstein-Kohlencylinder (s. Fig. 138 S. 236), der unten in einen stärkeren, aus-

gehöhlten Fuss ausläuft. Durch eine seitliche Durchbohrung kann die Luft beim Einsetzen des Cylinders entweichen.



Fig. 138.

Damit durch emporsteigende Flüssigkeit die Klemmschraube *K* nicht angegriffen wird, schiebt man zwischen diese und den Cylinder ein Bleiplättchen. Das Zink bildet, wie bei dem Kupferelement, einen Ring.

Das Element bleibt lange Zeit in brauchbarem Zustande, wenn es nur schwach in Anspruch genommen wird; gibt es längere Zeit einen stärkeren Strom ab, so geht seine elektromotorische Kraft, die anfangs 1,4 Volt beträgt, zurück, indem es sich polarisiert. Jedoch „erholt" es sich wieder, wenn eine längere Ruhepause folgt.

Die chemischen Vorgänge bestehen darin, dass sich aus Zink und Salmiak das Salz Chlorzink-Ammoniak $[Zn(ClNH_3)_2]$ bildet und Braunstein zu Manganoxyd (Mn_2O_3) unter Entstehung von Wasser reduziert wird.

Die Unterhaltung besteht darin, dass man von Zeit zu Zeit Wasser zusetzt und, wenn nötig, die Zinkelektroden von anhaftenden Krystallen befreit. „Zum Zwecke der Erneuerung sind die Elemente auseinander zu nehmen, die Gläser zu entleeren und zu reinigen, die Zinkringe durch Waschen und Schaben von Schlamm und Salz zu befreien. Die Kohlencylinder werden, nachdem Salzkrystalle und Schlamm abgeschabt sind, etwa 5 Minuten lang in fünfprozentige Schwefelsäure getaucht, dann längere Zeit entwässert und schliesslich gut an der Luft getrocknet." (Handbuch der Elektrot. XII, S. 30.)

b) Das Kupferoxyd-Zink-Element, Kupronelement. Zink und Kupferoxyd in Kali- oder Natronlauge liefern eine elektromotorische Kraft von 0,8 Volt. Der innere Widerstand eines solchen Elementes ist bei geeigneter Zusammensetzung sehr gering. Bei Stromabgabe wird Kupferoxyd zu

Kupfer reduziert, und Zink geht als Zinkhydroxyd in Lösung. Das poröse und schwammige Kupfer nimmt an der Luft, besonders schnell, wenn es erhitzt wird, Sauerstoff auf, sodass es nach völliger Oxydation wieder als positive Elektrode eingesetzt werden kann. Als Ableitungselektrode dient das aus Eisen angefertigte Gefäss.

Das Element wurde zuerst von Lalande und Edison zusammengesetzt und ist mehrfach modifiziert worden, um leichte und schnelle Oxydation des Kupfers zu erzielen [1]).

i) Trockenelemente. Der Elektrolyt (Salmiaklösung, Zinkoxyd) wird von einer porösen Masse (Gips, Sand, Sägemehl, Glaswolle etc.) aufgesaugt; es entsteht so eine feuchte Paste; Elektroden wie beim Leclanché-Element. Vielfach ist die äussere Hülle selbst (aus Zink) die negative Elektrode. Grosse Verbreitung haben besonders in der Reichstelegraphie das Hellesen-Patent-Trockenelement von Siemens & Halske und das Gassner-Trockenelement gefunden. Die elektromotorische Kraft beträgt bei beiden Elementen bei Beginn der Stromabgabe rund 1,5 Volt.

k) Beutelelement. Der Elektrolyt wird nicht von einer Masse aufgesaugt, sondern als Flüssigkeit zugesetzt; das Element ist also als nasses Element zu bezeichnen. Es zeichnet sich durch grosse Beständigkeit, gute Depolarisation, grosses Erholungsvermögen, geringen inneren Widerstand und bedeutende elektrische Leistung aus. Die Kohlenelektrode wird von dem Depolarisator umgeben und dieser durch einen Beutel, um den eine Schnur gewickelt ist, zusammengehalten. Das Standglas hat einen Einsatz, der den Zweck hat, die Elektroden nach dem Einsetzen festzuhalten; ferner ist der Zinkcylinder mit umgebogenen Lappen versehen, durch die er verhindert wird, sich zu bewegen.

2. Sekundärelemente, Akkumulatoren. Durch die Erfindung der Akkumulatoren ist die höchst wichtige Aufgabe gelöst worden, Energie aufzuspeichern, um sie später nach Bedarf verwerten zu können.

1) Näheres siehe Elektrot. Ztschr. 1906, S. 27.

a) Ein **Bleiakkumulator**[1]) in seiner einfachsten Gestalt besteht aus zwei Bleiplatten, die in verdünnte Schwefelsäure eintauchen. Schickt man durch den elektrolytischen Apparat einen elektrischen Strom (2—3 Volt), so bildet sich an der Anode (s. Fig. 139) Bleisuperoxyd, das eine braunrote Farbe hat; an der negativen Elektrode wird Bleioxyd (PbO),

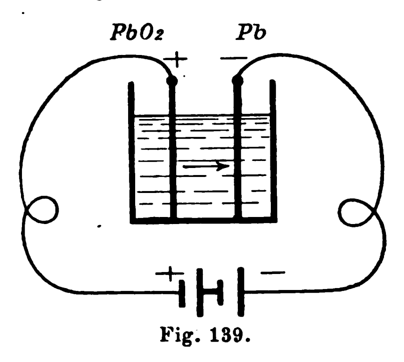


Fig. 139.

das sich, bevor die Bleiplatten in die Säure eingetaucht wurden, an der Luft gebildet hatte, zu metallischem Blei reduziert[2]). Es entsteht also die Kombination

$$Pb \mid H_2SO_4 + aq \mid PbO_2,$$

die, wie man mittels eines Messinstrumentes leicht nachweisen kann, ein galvanisches Element ist.

Bei der Entladung bildet sich an beiden Elektroden Bleisulfat ($PbSO_4$). Die beiden Platten werden also einander um so ähnlicher, je mehr Elektrizität der Akkumulator abgibt; die elektromotorische Kraft muss also während der Stromabgabe allmählich sinken.

---

1) Literatur: E. Hoppe, Die Akkumulatoren für Elektrizität; Die Akkumulatoren von E. Sieg (Handbuch der Elektrotechnik. 3. Band, 2. Abt.); F. Dolezalek, Die Theorie des Bleiakkumulators; K. Elbs, Die Akkumulatoren; Schoop, Handbuch der elektrischen Akkumulatoren; F. Grünwald, Die Herstellung der Akkumulatoren; W. Bermbach, Die Akkumulatoren (Theorie, Herstellung, Behandlung, Verwendung).

2) Das Bleioxyd wird zunächst durch die Schwefelsäure in Bleisulfat umgewandelt; dieses wird dann durch den Strom in PbO_2 bezw. Pb verwandelt.

Da der Bleiakkumulator nur dann elektrische Energie abgeben kann, wenn man ihm vorher solche zugeführt hat, so gehört er zu den **Sekundärelementen** (Gegensatz: Primärelemente).

Die Vorgänge bei der Entladung sind folgende: An der Anode werden Wasserstoffionen entionisiert, durch die im Verein mit Schwefelsäure Bleisuperoxyd in Bleisulfat umgewandelt wird:

$$+\text{ Elektrode: } PbO_2 + 2\,H + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2\,H_2O.$$

An der negativen Platte werden $\overset{=}{SO_4}$-Ionen entladen, die sich mit Pb zu $PbSO_4$ verbinden:

$$-\text{ Elektrode: } Pb + SO_4 = PbSO_4.$$

Durch Addition dieser Gleichungen erhalten wir den ganzen stromliefernden Prozess:

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2\,SO_4 = 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \;\ldots\ldots\; (1).$$

Wird der Akkumulator geladen (s. Fig. 139), so tritt der Strom an der positiven Elektrode in die Flüssigkeit ein. Da der Wasserstoff mit dem Strome wandert, so wird er jetzt an der negativen Elektrode frei. Dort verbindet er sich mit $PbSO_4$ zu Pb und H_2SO_4. Die an der Anode abgeschiedenen $\overset{=}{SO_4}$-Ionen zerstören unter Mitwirkung des Wassers das $PbSO_4$:

$$+\text{ Elektrode: } PbSO_4 + SO_4 + 2\,H_2O = PbO_2 + 2\,H_2SO_4$$
$$-\text{ Elektrode: } PbSO_4 + H_2 = Pb + H_2SO_4.$$

Addiert man auch jetzt die beiden Gleichungen, und zieht man auf beiden Seiten 1 Molekül H_2SO_4 ab, so erhält man:

$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O = PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4 \;\ldots\ldots\; (2).$$

Da die letzte Gleichung die Umkehrung der Gleichung (1) ist, so können wir beide zusammenfassen:

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2\,SO_4 \rightleftarrows 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O \;\ldots\ldots\; (3)$$

Der Akkumulator gehört also zu den umkehrbaren Elementen. Man nennt die entwickelte Theorie die **Sulfattheorie**; sie wird Dank den Untersuchungen **Dolezaleks** jetzt wohl allgemein als richtig anerkannt.

Während der Ladung des Akkumulators wird nach Gleichung (3) Wasser verbraucht und Schwefelsäure gebildet; daher wird die **Säuredichte bei Stromzufuhr grösser**; **bei der Entladung** wird umgekehrt Schwefelsäure gebunden und Wasser frei, so dass die **Konzentration der Säure abnimmt**.

Die elektromotorische Kraft, die übrigens von der Säurekonzentration und der Temperatur abhängig ist (s. S. 220), beträgt bei Beginn der Entladung rund 2 Volt, sie sinkt zuerst schnell, dann langsam. Beträgt die Klemmenspannung des stromabgebenden Akkumulators 1,8 Volt, so ist die Entladung als beendigt anzusehen.

Bei der Ladung steigt die Klemmenspannung schnell bis zu etwa 2,1 Volt, geht dann langsam in die Höhe; bei 2,5 bis 2,6 Volt entwickeln sich an beiden Elektroden Gase, der Akkumulator „kocht".

Wenn lebhafte Gasentwickelung (an beiden Elektroden) erfolgt, hört man mit der Entladung auf. Von Zeit zu Zeit muss jedoch eine Überladung erfolgen, wenn einer grösseren Anzahl von Zellen gleichzeitig Strom zugeführt wird, damit zurückgebliebenen Elementen Gelegenheit geboten wird, sich zu erholen. Es empfiehlt sich, bei Akkumulatoren, die selten benutzt werden (Laboratorium), jedesmal eine Überladung vorzunehmen.

Für die Ladung sind besonders Nebenschlussmaschinen geeignet. Zunächst nämlich kann man ihre Klemmenspannung leicht erhöhen. Nehmen wir ferner an, dass die elektromotorische Kraft der Maschine aus irgend einem Grunde, etwa infolge Gleitens des Riemens, plötzlich so stark sinkt, dass sie kleiner wird als die Spannung der Batterie [1]). Es schickt dann die Batterie Strom in die Maschine. Man erkennt nun leicht, dass der durch die Elektromagnetwickelung fliessende Strom der Batterie dieselbe Richtung hat, wie der von der Maschine selbst vor Eintritt der Störung in den Nebenschluss geschickte. Die Feldmagnete ändern also ihre Polarität nicht, und es behält daher auch die im Anker induzierte elektromotorische Kraft ihre Richtung bei. Ist der Grund für die Abnahme der Maschinenspannung nicht mehr vorhanden, so schickt die Dynamo wieder Strom in die Batterie. Für die Hauptstrommaschine dagegen ergibt sich leicht, dass sie umpolarisiert wird, wenn ihre elektromotorische Kraft unter diejenige der Maschine sinkt.

Soll eine Zelle oder eine kleine Batterie aus einer Lichtleitung, deren Spannung gewöhnlich 110 oder 220 Volt beträgt, geladen werden, so kann man statt eines grösseren Kurbelrheostats Glühlampen als Vorschaltwiderstand benutzen. Eine 16-kerzige

---

1) Man denke sich in Fig. 107 (S. 171) die Nutzleitung *N* durch eine Akkumulatorenbatterie ersetzt, deren positiver Pol links liegt.

Glühlampe für 110 Volt verbraucht etwa 0,5 Amp., hat also bei normalem Stromdurchgang einen Widerstand von 220 Ohm. Schaltet man n solcher Lampen parallel, so entspricht die Gruppe einem Widerstand von $\frac{220}{n}$ Ohm. Das Schaltungsschema ist in Figur 140 dargestellt: L_1 und L_2 sind die Drähte der Stark-

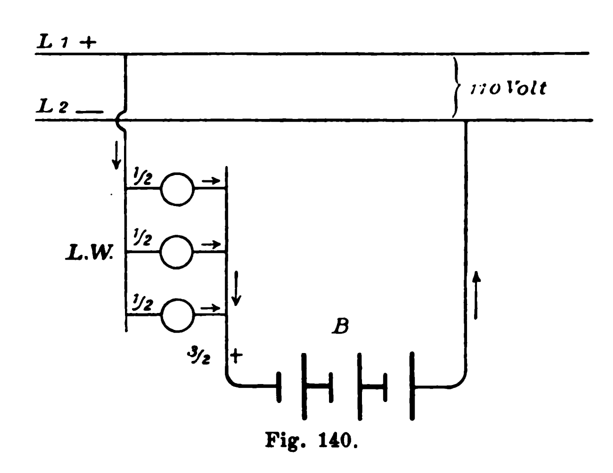


Fig. 140.

stromleitung, *LW* ist ein aus den Lampen bestehender Widerstand, *B* die zu ladende Batterie. In Figur 141 ist ein Lampenwiderstand mit 6 Lampen abgebildet. Dadurch, dass man 1, 2 etc. Lampen einsetzt, kann man den Strom variieren. Will man mehr als 3 Amp. haben, so nimmt man 25-kerzige Lampen.



Fig. 141.

Wenn es sich um die Ladung einer kleineren Anzahl von Zellen handelt, so ist die Verwendung der Thermosäule am Platze. Am verbreitetsten ist die Thermosäule von Gülcher. Ihre elektromotorische Kraft beträgt 3,5—4 Volt. Man muss also die zu ladenden Elemente parallel schalten.

Es ist zu beachten, dass die Ladung, wenn möglich sofort, spätestens aber 24 Stunden nach beendigter Entladung erfolgen muss. Lässt man einen Akkumulator längere Zeit im entladenen Zustande stehen, so tritt Sulfatierung ein;

die Platten bedecken sich mit schlecht löslichem, krystallinischem Bleisulfat, und es kann starke Krümmung erfolgen.

Sowohl bei der Ladung wie bei der Entladung darf man eine gewisse Stromstärke nicht überschreiten (maximaler Lade- bezw. Entladestrom), weil sonst der Akkumulator Schaden leidet (Krümmen der Platten, Herausfallen aktiver Masse). Wenn man daher bei einem Versuche nicht weiss, wie stark der den Akkumulatoren zu entnehmende Strom wird, so muss man einen Rheostat und ein Amperemeter einschalten (s. Fig. 142). Ausserdem empfiehlt es sich, wenn die Stromabgabe längere Zeit dauert, oder wenn man über den Ladezustand der Batterie nicht unterrichtet ist, mittels eines Voltmeters die Klemmenspannung zu messen, wie es in der Fig. 142 angedeutet ist. In dieser ist *A* der Apparat, dem man Strom zuführen will, *W* der Rheostat.

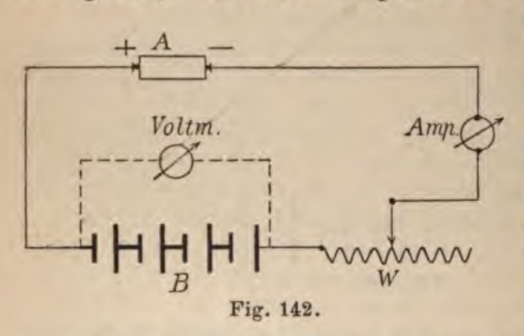


Fig. 142.

Nach Verringerung der Belastung, besonders nach Öffnung des Stromkreises steigt die Spannung zuerst schnell, dann langsam. Die Erklärung für diese Erscheinung, die man als Erholung bezeichnet, ist folgende: während der Stromabgabe wird Schwefelsäure verbraucht, die Konzentration der Säure in den Poren der aktiven Masse und unmittelbar an der Oberfläche der Platten sinkt und daher auch die elektromotorische Kraft, die ja von der Säuredichte abhängig ist. Während der Ruhepause wird die Säuredichte in und an den Elektroden wieder grösser (Diffusion), und die elektromotorische Kraft steigt.

Von den Vorgängen, die sich im offenen Akkumulator abspielen, sei noch die Selbstentladung erwähnt. Lässt man einen geladenen Akkumulator unbenutzt stehen, so nimmt seine Kapazität von Tag zu Tag ab, und die Säuredichte sinkt allmählich. Verunreinigungen der Säure, besonders die Anwesenheit von fremden Metallen können eine unter Umständen sehr stark beschleunigte Selbstentladung zur Folge haben.

Unter der Kapazität eines Akkumulators versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, ausgedrückt in Amperestunden[1]), die der Akkumulator abgeben kann.

Beispiel: eine Zelle wurde mit 8 Ampere entladen; nach $3^1/_2$ Stunden war das Element erschöpft, d. h. seine Spannung auf 1,8 Volt gesunken. Die Kapazität betrug also $8 . 3^1/_2 = 28$ Amperestunden.

Die Kapazität hängt von der Konstruktion der Platten, ihrem Alter, von der vorhergegangenen Behandlung der Zelle, vor allem natürlich von der Grösse der Platten ab. Bei Elementen, die eine grosse Kapazität haben sollen, nimmt man nicht eine grosse positive und eine grosse negative Elektrode, sondern man verbindet mehrere kleinere positive bezw. negative Platten durch Fahnen und Bleistreifen miteinander, wie man aus Fig. 143 ersehen kann.

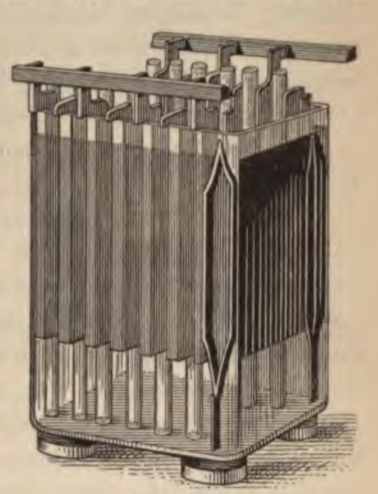


Fig. 143.

Nutzeffekt nennt man das Verhältnis zwischen der vom Akkumulator abgegebenen und der ihm zugeführten Energie. Im Laboratorium kann man einen Nutzeffekt von 90 und mehr Prozent erreichen, im praktischen Betriebe beträgt derselbe 75—80 %.

Beispiel: Eine Zelle wurde mit 20 Amp. 5 Stunden lang geladen, die mittlere Ladespannung ergab sich zu 2,2 Volt; die dem Akkumulator zugeführte Energie betrug also

$$q_1 = 5 . 20 . 2{,}2 = 220 \text{ Wattstunden.}$$

Die Zelle wurde etwa $^1/_2$ Stunde nach der Ladung mit 20 Amp. entladen, nach ungefähr $4^1/_2$ Stunden war die Klemmenspannung auf 1,8 Volt gesunken. Da die mittlere Spannung, wie die

1) Amperestunde = derjenigen Elektrizitätsmenge, die in 1 Stunde durch einen Querschnitt der Leitung fliesst, wenn die Stromstärke 1 Amp. beträgt.

Messungen ergaben, jetzt rund 1,9 Volt betrug, so belief sich die vom Elemente abgegebene Energie q_2 auf

$$q_2 = 4^1/_2 . 20 . 1{,}9 = 171 \text{ Wattstunden.}$$

Mithin war der Nutzeffekt

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{171}{220} = 0{,}77 \text{ oder } 77\,\%.$$

Zellenschalter. In elektrischen Anlagen muss die Spannung möglichst auf konstanter Höhe gehalten werden. Bei der Entladung sinkt aber die elektromotorische Kraft der einzelnen Zellen langsam. Man muss daher von Zeit zu Zeit eine der in der Reserve stehenden Zellen zu den bereits an der Stromlieferung beteiligten hinzuschalten. Da die Reservezellen nicht so stark beansprucht werden wie die anderen Elemente, so fangen sie bei der Ladung früher an zu gasen und müssen abgeschaltet werden. Derjenige Apparat, der es ermöglicht, nach Bedarf Zellen ab- oder hinzuzuschalten, heisst Zellenschalter.

b) Alkalische Sammler (Jungner, Edison). Als Elektrolyt wird bei den von Jungner und Edison erfundenen Sammlern 20—25-prozentige Kalilauge (KOH) verwendet. Die positive wirksame Masse besteht aus Nickel-Sauerstoffverbindungen, die negative [1]) in geladenem Zustande aus niedrigen Sauerstoffverbindungen des Eisens (oder aus metallischem Eisen oder aus einem Gemenge beider). Um die Leitfähigkeit der fein verteilten wirksamen Masse zu erhöhen, wird ihr Graphit zugesetzt, das an den chemischen Prozessen aber nicht beteiligt ist. Das Gemenge wird von kleinen Taschen (Büchsen, Kästchen) aufgenommen, die aus sehr dünnem Federstahl hergestellt werden und mit vielen kleinen Löchern versehen sind, damit der Elektrolyt Zutritt hat. Die Taschen werden in grösserer Zahl von einem fensterrahmenartigen Gitter aufgenommen.

Bei der Ladung wird die Eisenverbindung zu metallischem (oder in eine niedrigere Oxydationsstufe) reduziert und [...]lverbindung oxydiert. Der Effekt ist derselbe, wie [...]erstoff (bezw. OH) von der einen Elektrode ab-

[1]) [...]ner setzt dem Eisen Kadmiumoxyd zu.

gegeben und, nachdem er durch den Elektrolyt gewandert ist, von der anderen Elektrode aufgenommen würde. Bei der Entladung wird das Eisen oxydiert und das Nickel reduziert. Der Sauerstoff wandert also im umgekehrten Sinne wie bei der Ladung. Die Zelle wird daher auch als Sauerstofftransporteur bezeichnet.

Da weder bei der Ladung noch bei der Entladung KOH verbraucht wird, so genügt eine geringe Menge des Elektrolyts[1]).

Die geladene Zelle hat anfänglich eine elektromotorische Kraft von etwa 1,5 Volt. Wird sie mit der der dreistündigen Entladung entsprechenden Stromdichte beansprucht, so sinkt die Spannung sofort auf etwa 1,4 Volt, nach 3 Stunden beträgt die Spannung nur noch etwa 1 Volt. — Der Nutzeffekt ist weit geringer als derjenige des Bleiakkumulators.

3. **Galvanoplastik und Galvanostegie** (oder **Elektroplattierung).** Unter Galvanoplastik versteht man das Verfahren, mittels der Elektrolyse Nachbildungen von Gegenständen herzustellen; hierher gehört die Herstellung von Platten für Druckereien, ferner die Herstellung von Galvanos oder Klischees, von Metallformen, wie sie bei der Fabrikation von Pressplatten in der Keramik Verwendung finden, die Herstellung von Hohlgalvanos (Köpfen, Figuren etc.). Elektroplattierung oder Galvanostegie nennt man die Erzeugung eines dünnen Metallüberzuges auf gebrauchsfertigen Gegenständen, sei es um diesen ein schöneres Aussehen zu verleihen, sei es um sie vor dem zerstörenden Einflusse der Luft (oder des Wassers) zu schützen. Der prinzipielle Unterschied zwischen Galvanoplastik und Galvanostegie besteht also darin, dass man bei ersterer einen dickeren Metallniederschlag herstellen muss, den man von dem Original abheben kann, während bei der Galvanostegie ein dünner und festhaftender Überzug erzeugt wird.

---

1) Bei dem Bleiakkumulator ist die Schwefelsäure an dem chemischen Umsatz beteiligt. Daher muss pro Amperestunde Kapazität eine gewisse Menge H_2SO_4 vorhanden sein.

Ein Metall kann aus einer Lösung seines Salzes primär oder sekundär gewonnen werden. Die Metallausscheidung ist primär, wenn sich in dem Elektrolyt die Ionen des betreffenden Metalls befinden und die Zersetzungsspannung so hoch ist, dass diese Ionen zur Abscheidung gelangen. Bei der primären Ausfällung besitzt häufig der Niederschlag keine gleichmäßige und schöne Oberfläche. Man kann dies (nach Arrhenius) folgendermaßen erklären. Nehmen mir an, dass wir aus einer Metalllösung, z. B. aus Silbernitratlösung, etwas Metall (Silber) abgeschieden haben. Geht die Ausfällung weiter vor sich, so setzen sich die frei gewordenen Silberteilchen lieber an die schon vorhandenen Silberpartien an als an die fremde Substanz[1]; das Silber scheidet sich körnig, krystallinisch ab. Wird hingegen das Silber sekundär aus Silbercyankaliumlösung gewonnen, so scheidet sich primär Kalium ab, durch das Kalium wird dann sekundär das Silber ausgefällt. „Dieses Silber setzt sich natürlich an den Stellen ab, wo sich vorher das primär abgeschiedene Kalium befand. Letzteres hat aber gar keinen Grund an den Stellen auszufallen, wo sich schon das Silber befindet; folglich geschieht die Abscheidung des Silbers gleichförmiger, und es entsteht ein glatter, schöner Überzug der Elektrode." (Arrhenius, Lehrbuch der Elektrochemie, S. 268.)

Für diese Erklärung spricht auch die Beobachtung, dass primär entwickelter Wasserstoff in grösseren Gasblasen, sekundär abgeschiedener in ganz kleinen Bläschen die Elektrode verlässt. Man schalte, um dies zu zeigen, zwei elektrolytische Apparate derselben Art und von derselben Grösse (s. Fig. 129) hintereinander, von denen der eine mit verdünnter Schwefelsäure, der andere mit Natriumsulfat- (oder KOH-)lösung gefüllt ist. Die Flüssigkeit in dem ersten Apparate bleibt oberhalb der negativen Elektrode wasserhell, während die zweite durch zahlreiche kleine Gasbläschen milchig wird.

---

1) Es sei an einen analogen Vorgang erinnert. Bekanntlich kann man übersättigte Lösungen von Salzen, z. B. von Glaubersalz, herstellen und aufbewahren; befindet sich aber ein Krystall des betreffenden Salzes in der übersättigten Lösung, so scheidet sich das Salz ab und setzt sich an den vorhandenen Krystall.

Aus dem erörterten Grunde bevorzugt man in der Elektroplattierung die sekundäre Elektrolyse, wobei man mit Vorliebe, besonders bei Abscheidungen von Gold, Silber und Kupfer Doppelcyanide benutzt, z. B. Silbercyankalium [$Ag(CN)_2K$ oder $\overset{+}{K} + \overline{Ag(CN)_2}$].

Zusammensetzung der Bäder. Als Lösungsmittel benutzt man destilliertes Wasser oder Regenwasser. Ein wichtiger Faktor ist die Reinheit der Chemikalien, selbst geringe Verunreinigungen können zu ganz abnormen Erscheinungen Veranlassung geben. Von grosser Wichtigkeit ist ferner die Konzentration der Bäder.

Ist das Bad zu stark, oder wie der Fachmann sagt *überkonzentriert*, so können sich an den Anoden und an den Wänden der Wannen Krystalle ansetzen. Das Bad darf aber auch nicht *metallarm* sein, weil sich sonst die Niederschläge langsamer oder weniger dicht bilden. — Durch die Konzentrationsunterschiede, die infolge ungleicher Wanderungsgeschwindigkeit der beiden Ionenarten entstehen, können Störungen verursacht werden. Diese werden durch Zirkulation des Elektrolyts vermieden.

Meistens werden den Bädern Chemikalien zugesetzt, deren Rolle bei der Metallabscheidung oft schlecht zu erkennen ist. Man kann zu einem Bade aus drei Gründen Substanzen zusetzen, die bei der Elektrolyse indifferent sind. 1) Erstens ist die Verbesserung des Leitvermögens zu nennen. Hier ist der Zusatz von Schwefelsäure zu Kupfervitriollösung zu erwähnen. Die Ionen der Schwefelsäure beteiligen sich bei der Elektrolyse an der Stromleitung, während bei richtig bemessener Spannung nur die Ionen des Kupfers zur Abscheidung gelangen. Salze, die dem angegebenen Zwecke dienen, nennt man *Leitsalze*. 2) Kann durch den Zusatz beabsichtigt werden, den schädlichen Einfluss von Produkten, die sich bilden, oder von Verunreinigungen zu beseitigen bezw. zu mildern. 3) Man hat die Erfahrung gemacht, „dass verhältnismäßig kleine Zusätze organischer Substanzen, wie Alkohol, Zucker, Gelatine, verschiedene Eigenschaften, wie die Dichte, den Glanz, die Elastizität der ausgefällten Metallschichten verbessern. Theoretisch hat man diese Einflüsse noch nicht aufzuklären vermocht“

(Arrhenius, l. c. S. 269). Bei der Silberausfällung setzt man häufig organische Körper zum Bade, um den Glanz zu erhöhen.

Während des Betriebes ändern sich die Bäder oft, nicht nur wegen der Vorgänge bei der Elektrolyse, sondern auch infolge Aufnahme von Sauerstoff oder Kohlensäure der Luft. Z. B. nimmt das cyankaliumhaltige Silberbad Kohlensäure aus der Luft auf unter Bildung von kohlensaurem Kalium. Die Bäder müssen daher, nachdem sie einige Zeit im Gebrauche waren, aufgefrischt, regeneriert werden.

Eines der wichtigsten Bäder ist das Kupferbad. Seine Zusammensetzung richtet sich nach dem Zwecke, dem es dienen soll, vor allem nach dem Gegenstande, auf dem man einen Niederschlag erzeugen will. Die Metallausscheidung erfolgt primär oder sekundär (saure und alkalische Bäder). Bei der Elektroplattierung sind es meistens die elektropositiveren Metalle, d. h. die Metalle mit einer grösseren Lösungstension als Kupfer (nämlich Zink, Eisen, Zinn), die verkupfert werden sollen, sei es als Vorbereitung für den folgenden Prozess (z. B. für die Vernickelung), sei es um durch einen stärkeren Niederschlag die Metalle gegen Oxydation zu schützen. Taucht man ein solches Metall in Kupfervitriollösung, so wird daraus pulverförmiges Kupfer gefällt. Es können deshalb saure Kupfersalzlösungen nicht bei der Verkupferung der betreffenden Metalle Verwendung finden. Ein sehr empfehlenswertes alkalisches Bad ist nach Roseleur folgendes: in 7 Liter warmem destilliertem Wasser löst man 250 g krystallisierte Soda, fügt allmählich 200 g doppelt schwefligsaures Natron (pulverisiert) hinzu und setzt dann 200 g essigsaures Kupferoxyd ebenfalls in kleinen Portionen unter fleissigem Umrühren zu. Anderseits löst man 225 g Cyankalium in 3 Liter kaltem Wasser und vermischt die beiden Lösungen nach dem Erkalten der ersten Flüssigkeit. Die Regenerierung besteht in dem Ersatz des abgeschiedenen Kupfers durch Zugabe von Kupfercyanürcyankalium und Entfernung von kohlensaurem Kali durch Zusatz von Cyanbarium.

Es bildet sich bei der Zusammensetzung Cyankupferkalium ($CuCy_2K$), das sich in ein Kaliumion und ein $CuCy_2$-Ion spaltet. Das Kalium verbindet sich, nachdem es seine Ladung abgegeben hat, mit Cyankupferkalium

$$KCuCy_2 + K = Cu + 2\,KCy.$$

An der Anode spielt sich der Vorgang ab

$$CuCy_2 + Cu = 2\,CuCy \text{ (Kupfercyanür).}$$

Das Kupfercyanür bildet an der Anode einen grünlichen Niederschlag, der sich beim Umrühren in dem an der Kathode entstandenen Cyankalium löst.

Bei grosser Stromdichte entsteht an der Kathode (ausser KCy) sekundär Wasserstoff aus Kalium und Wasser

$$K + H_2O = KOH + H.$$

Das bedeutet einen Verlust von KCy, so dass dann nicht mehr alles an der Anode gebildete Kupfercyanür gelöst werden kann[1]).

Das saure Kupferbad wird vielfach nach folgendem Rezepte hergestellt: 18 kg $CuSO_4$ werden übergossen mit 40 Liter siedendem Wasser und 6 kg konzentrierter Schwefelsäure. Nach dem Erkalten wird filtriert und so lange Wasser zugesetzt, bis man 100 Liter hat. Dann setzt man 1 kg 96-prozentigen Alkohol zu.

Für die Versilberung benutzt man meistens das cyankalische Silberbad, auf dessen Zusammensetzung kurz eingegangen werden soll. 100 g Silbernitrat ($AgNO_3$) enthalten 63,5 g metallisches Silber; um dieses in Cyansilber zu verwandeln, sind 38,25 g reines (98 prozent.) Cyankalium nötig. Durch weiteres Cyankalium wird das Cyansilber in Cyansilber-Cyankalium umgewandelt; hierzu sind nochmals 38,25 g reines Cyankalium nötig. Also entsprechen 100 g $AgNO_3$ oder 63,5 g Silber 76,5 g KCN.

Das aus reinem Silber und reiner Salpetersäure hergestellte salpetersaure Silber wird entweder in Chlorsilber oder in Cyansilber umgewandelt. Um ersteres zu erreichen, behandelt man die stark verdünnte $AgNO_3$-Lösung mit Salzsäure. Wenn es sich um die Versilberung von Zinnwaren handelt, so muss dem Einbringen in das Cyanbad eine Verkupferung

1) Näheres siehe W. Pfanhauser, Elektroplattierung, Galvanoplastik, Metallpolierung, 4. Aufl.

vorausgehen. Diese letztere ist überflüssig, wenn man das sogenannte Laugenbad benutzt: nach Herstellung und gutem Auswaschen des AgCl wird dieses in Kalilauge in $AgK(OH)_2$ umgewandelt. Beim Arbeiten mit diesem Bade verwendet man eine grosse Anodenfläche und hohe Spannung (2,5—3 Volt).

Die Konzentration des Bades an Silber richtet sich nach dem Zwecke, dem das Bad dienen soll. Man unterscheidet zwischen der gewöhnlichen, soliden Versilberung, der schweren Versilberung oder Starkversilberung und der Silbergalvanoplastik (Nachdruck, Abbildung eines Gegenstandes, z. B. einer Münze). Je dicker die Schicht werden soll, um so grösser muss der Gehalt des Bades an Silber sein.

1. Chlorsilberbad für gewöhnliche, solide Versilberung: 1 Liter Wasser, 10 g Feinsilber als Chlorsilber, 20 g Cyankalium. Stromdichte 0,3 Amp. per dm^2, Badspannung bei 15 cm Elektrodenabstand 1,5 Volt.
2. Cyansilberbad für Starkversilberung: 1 Liter Wasser, 25 g Feinsilber als Cyansilber, 27 g Cyankalium. 0,3 Amp., 1,3 Volt.
3. Chlorsilberbad für Starkversilberung: 1 Liter Wasser, 25 g Feinsilber, 42 g Cyankalium. 0,25 Amp., 0,9 Volt.
4. Silbergalvanoplastik: 1 Liter Wasser, 50 g Feinsilber als Cyansilber, 150 g Cyankalium. Stromdichte 0,2—0,5 Amp., Badspannung 0,2—0,45 Volt.

Nickelbad. Als Metallsalze kommen hauptsächlich Nickelammonsulfat und Nickelsulfat zur Verwendung; Zugabe von anderen Salzen hat den Zweck, die Leitfähigkeit zu erhöhen. Als Anoden werden gegossene oder gewalzte Nickelplatten benutzt, letztere z. B. bei der Zinkvernickelung.

Für Eisen-, Stahl- und Messingwaren, die einzeln eingehängt werden, empfiehlt Pfanhauser ein Bad aus 1 Liter Wasser, 40 g Nickelsulfat, 35 g Natriumcitrat. Die Badspannung beträgt bei 15 cm Elektrodenentfernung 2,5—3 Volt, die Stromdichte 0,27 Amp. pro 1 dm^2.

Die elektrolytische Verzinkung[1]) wird in grossem Maßstabe hauptsächlich zur Verzinkung von Röhren für Wasser-

1) Näheres siehe Monographien über angewandte Elektrochemie. Elektrolytische Verzinkung von Cowper-Coles. Ins Deutsche übertragen von Dr. E. Abel. W. Knapp, 1905.

röhrenkessel, ferner von Drähten, Schrauben, Nägeln etc. ausgeübt. Als Elektrolyt dient eine Zinksulfat- oder Zinkchlorid- oder Zinkacetatlösung nebst Zusätzen (z. B. Alkali- oder Erdalkalisulfat zu einer schwachen Lösung von Zinksulfat); die Ware bildet die Kathode, die Anode besteht aus einer Zinkplatte. Da die Verwendung von Zinkanoden zu Störungen führen kann (Abbröckeln von Zink, rauher oder unebener Niederschlag), so verwendet man als Anoden vielfach Bleiplatten (in diesem Falle ist natürlich eine Regenerierung des Bades nötig). Die Badspannung ist dann allerdings erheblich grösser; sie steigt bei 161 Amp. pro 1 m^3 auf 3,2 Volt (statt 0,6 Volt bei Zinkanoden). „Es ist grösstenteils die Neigung zur Zinkschwammbildung vorhanden, die eine den technischen Anforderungen genügende Verzinkung oft beeinträchtigt, und welche bewirkt, dass das Zink, ist es auch anfänglich gut und glatt ausgefallen, bald schwammig und unbrauchbar wird“ (l. c. S. 9). Nach Siemens & Halske wird die Zinkschwammbildung durch eine Zinkwasserstoffverbindung (Legierung, ZnH_2), die an dem Niederschlag erfolgt, verursacht. Sie setzen, um dies zu verhindern, der neutralen oder schwach sauren Zinksulfatlösung unterchlorige Säure u. ä. Chemikalien zu, die den Wasserstoff in statu nascendi zu oxydieren vermögen.

Gute Resultate werden auch erzielt, wenn die Lösung möglichst konzentriert und warm gehalten wird (40—50°). Die Badspannung muss bei ruhender Ware 5—6 Volt betragen. Als Anoden sind gewalzte Zinkplatten zu verwenden.

Die Stromdichte bezogen auf die Kathode spielt bei der Galvanoplastik und Galvanostegie eine sehr grosse Rolle, da von ihr nicht nur die Beschaffenheit des Niederschlags, sondern auch die Badspannung abhängig ist. Für saure Bäder ist sie anders zu bemessen als für cyankalische.

Für saure Kupferbäder gilt nach von Hübel folgendes: soll Kupfer von grosser Festigkeit und Härte niedergeschlagen werden, und wird auf grosse Zähigkeit weniger Gewicht gelegt, so ist eine hohe Stromdichte von 2—3 Amp. pro dm^2 anzuwenden. Verlangt man Kupfer von möglichst grosser Zähigkeit, und sind Härte und Festigkeit weniger von Wichtigkeit,

so sind 0,6—1 Amp. pro dm² zweckentsprechend. Für die Erzeugung von Kupferdruckplatten empfiehlt sich eine Stromdichte von ca. 1,3 Amp.

Will man nur einen dünnen Metallüberzug erzeugen, so arbeitet man mit geringer Stromdichte, z. B. bei der Verkupferung in dem oben beschriebenen cyankalischen Bade mit 0,5 Amp. pro dm².

Vorbereitung der Waren[1]. Ehe die Waren ins Bad kommen, ist fast immer mechanische und chemische Behandlung nötig. Erstere besteht darin, der Ware durch Kratzen eine reinere und durch Schleifen und Polieren eine glatte, glänzende Oberfläche zu verleihen. Der Niederschlag bildet sich nämlich genau der Fläche des Grundmetalls entsprechend. Man kann z. B. eine rauhe Oberfläche durch Galvanisieren nicht in eine glatte verwandeln. Die chemische Behandlung hat hauptsächlich den Zweck, die mechanisch vorbereiteten Waren von anhaftendem Öl, Fett, Schmutz zu befreien. Auf denjenigen Stellen der Ware, die keine rein metallische oder gut leitende Oberfläche haben, schlägt sich das Metall schlecht nieder, auch findet dort keine innige Vereinigung des Niederschlags mit dem Grundmetall statt.

Besonders das sogenannte Entfetten (Dekapieren) muss mit der peinlichsten Sorgfalt ausgeführt werden. Es geschieht durch Behandlung mit Benzin, heisser verdünnter Natronlauge, Abreiben mit einem Brei aus Wiener Kalk.

Das Verfahren bei der Galvanoplastik soll an einem einfachen Beispiele erläutert werden. Von einer Kupferstichplatte soll eine Kopie hergestellt werden. Man erzeugt einen dicken Kupferniederschlag, den man abheben[2] kann; man erhält ein Negativ, d. h. den Vertiefungen des Originals entsprechen Erhöhungen des Abdrucks und umgekehrt. Wird von dem Negativ auf galvanoplastischem Wege in der eben beschriebenen Weise ein neuer Abdruck hergestellt, so entsteht

1) Siehe Dr. Langbein, Einrichtung und Betrieb galvanoplast. Anstalten.

2) Um dies zu ermöglichen, versieht man die Platte mit einer sehr dünnen Schicht von AgJ (Versilbern, Behandlung mit Jodwasser), die man dem Tageslichte aussetzt, bis sie grau geworden ist.

eine Kopie mit derselben Schärfe und Feinheit der Linien, wie sie das Original besitzt. Das Verfahren wird bedeutend vereinfacht, wenn man das Negativ auf anderem Wege herstellt. Man drückt das Original in einer weichen, plastischen Masse ab, die später erhärtet (Gips, Wachs, Guttapercha, oder ein Gemenge aus Bienenwachs, Paraffin, Graphit und Terpentin etc.). Dieses Negativ macht man durch Einreiben mit feinst verteiltem Graphit leitend. Das „Graphitieren" führt man mit einer weichhaarigen Bürste aus, die man in das Graphitpulver taucht und in kreisförmigen Bewegungen über die leitend zu machende Fläche führt. Die Stromzuführung geschieht durch einen Kupferdraht, den man ringsum in das Präparat eindrückt.

Die Matrize wird an einer Messingstange (Fig. 144) auf-

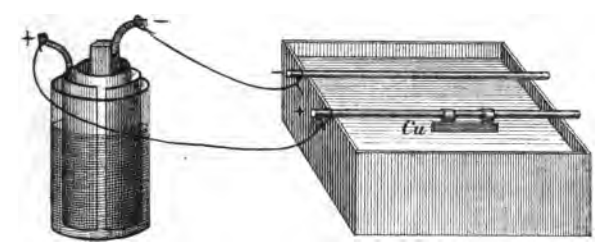


Fig. 144.

gehängt. Benutzt man als Anode eine Kupferplatte (Bad aus Kupfervitriol), so bleibt der Kupfergehalt der Lösung konstant.

Für galvanoplastische Versuche in kleinem Maßstabe, bei denen Kupfer ausgeschieden werden soll, kann man den sog. Zellenapparat benutzen, der in Fig. 145 abgebildet ist. In das Batterieglas giesst man konzentrierte Kupfervitriollösung und legt auf den Boden noch einige Krystalle dieses Salzes. Die Tonzelle *T*, in der sich ein amalgamierter Zinkcylinder befindet, füllt man mit stark verdünnter Schwefelsäure. Der an der Klemme *K* befestigte Draht ist bis auf die in der Flüssigkeit befindliche Spitze durch Guttapercha isoliert.

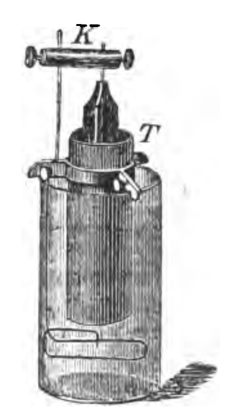


Fig. 145.

Die Matrize legt man auf die Drahtschleife und sorgt dafür, dass sie von dem blanken Drahtende berührt wird. Die Anordnung ist ein Danniell-Element, dessen positiven Pol anfänglich die Drahtspitze bildet. Der bei Beginn des Versuches sehr hohe Widerstand nimmt im Laufe der Zeit ab, weil Schwefelsäure in die Kupferlösung hineindiffundiert und die positive Elektrode allmählich grösser wird (infolge der Kupferablagerung auf der Matrize).

4. **Elektrometallurgie** [1]. Auch hier können nur einige wenige Beispiele behandelt werden.

Metalle können elektrochemisch gewonnen werden, indem man entweder eine wässerige Lösung oder eine geschmolzene Verbindung des Metalles elektrolysiert.

a) Gewinnung von Reinkupfer (Kupferraffination). Die hüttenmännisch gewonnenen Rohprodukte enthalten eine ganze Reihe von Beimengungen, durch die der Wert des Kupfers (besonders als Leitungsmaterial) herabgedrückt wird. Um chemisch reines Metall zu erhalten, bedient man sich der elektrolytischen Kupferraffination. Das von der Hütte kommende Rohkupfer (Schwarzkupfer) wird zu 1—2 cm dicken Platten umgegossen und als Anoden abwechselnd mit reinen Kupferblechkathoden in vierkantige Holztröge eingehängt, die mit einer Lösung von Kupfersulfat und Schwefelsäure beschickt werden. Die Badspannung darf, damit nicht auch Verunreinigungen abgeschieden werden, 0,5 Volt nicht überschreiten, ferner muss die Konzentration der Kupferionen in der Nähe der Kathode (wo sie sich abscheiden sollen) eine hohe bleiben. Gute Zirkulation des Elektrolyts ist daher für den Erfolg unumgänglich notwendig.

Der grösste Teil der Verunreinigungen (Schwefelkupfer, Wismut, Zinn, Gold, Silber, Arsen etc.) fällt entweder unverändert oder als unlösliche Verbindungen von der Anode in den sogenannten Anodenschlamm herunter; die im Rohkupfer enthaltenen Metalle von hoher Lösungstension (Eisen, Zink, Nickel und Kobalt) gehen in Lösung, so dass das Bad im Laufe der Zeit immer reicher an

---

1) Hingewiesen sei hier auf das Werk: Elektro-Metallurgie. Von Dr. W. Borchers.

solchen Metallen, dagegen ärmer an Kupfer wird. Anderseits kann eine Nebenreaktion zur Folge haben, dass das Bad an Kupfer reicher wird. Es bildet sich nämlich an der Anode statt $CuSO_4$ (Kuprisulfat) Kuprosulfat (Cu_2SO_4), d. h. auf 1 SO_4-Radikal kommen 2 Kupferatome. Die Reaktion, durch die fortwährend etwas Kupfer gelöst wird, verläuft um so schneller, je geringer die Stromdichte und je mehr die Flüssigkeit infolge der (künstlich hervorgerufenen) Bewegung mit der Luft in Berührung kommt; besonders in der Nähe der Oberfläche erreicht sie eine bedeutende Höhe [1]).

Die Praxis hat gezeigt, dass es sich nur lohnt, schon ziemlich reines Rohmaterial in Arbeit zu nehmen, damit die störende und kostspielige Erneuerung des Elektrolyts möglichst wenig nötig ist und die Stromarbeit möglichst nur auf den Transport des Kupfers von der Anode zur Kathode beschränkt bleibt.

Die Gewinnung des Kupfers auf elektrolytischem Wege direkt aus den Erzen selbst oder aus Kupferstein, d. h. aus einem noch stark verunreinigten hüttenmännischen Rohprodukte, ist oft in Angriff genommen worden; jedoch scheint die Frage bis jetzt noch nicht praktisch gelöst zu sein.

b) Silber. Es lässt sich leicht durch den elektrischen Strom in einer für alle Verbrauchszwecke geeigneten Form abscheiden. Man gewinnt es durch Elektrolyse aus Legierungen nach zwei Methoden: 1) an der Anode, die aus der zu scheidenden Legierung besteht, werden die anderen Metalle gelöst, so dass das Silber zurückbleibt; 2) das Silber geht in Lösung und wird herauselektrolysiert, während die anderen Metalle zurückbleiben. Ersteres Verfahren ist mit einigem Erfolge durchführbar, wenn das zu lösende Metall in grossem Überschuss vorhanden ist (Raffination von Schwarzkupfer, von Werkblei [2]), Scheidung des Zinkschaumes).

---

1) Nach Arrhenius ist das Kuprosalz höchst nachteilig für die Elektrolyse (l. c. S. 263).

2) Das Silber der meisten Erze lässt sich durch Verschmelzen mit Bleierzen oder sogen. „Eintränken“ in ein geschmolzenes Bleibad in eine Legierung überführen — Verbleiung. Eine sehr silberarme Legierung mit weniger als 1 % Silber nennt man Werkblei. Wird dieses ge-

Das Rössler-Edelmannsche Werkbleientsilberungs-Verfahren besteht darin, dem Werkblei (s. unten) statt reinen Zinks aluminiumhaltiges Zink zuzusetzen. Der Zinkschaum wird silberreicher und bleiärmer. Der Elektrolyt besteht aus einer Lösung von Chlorzink-Chlormagnesium; herauselektrolysiert wird das Zink. Der Anodenschlamm enthält, nachdem er getrocknet ist, ca. 75 % Silber und 12 % Blei.

Die zweite Methode ist am Platze, wenn Silber in solcher Menge in der Legierung vorhanden ist, dass ein zweiter ev. dritter Bestandteil an der Anode pulverförmig zurückbleibt. Diese Bedingung ist erfüllt bei der Raffination goldhaltigen Silbers. Um ein Verbleiben der Edelmetalle im Betriebe möglichst zu vermeiden, arbeitet man mit sehr grosser Stromdichte; sie beträgt anfänglich etwa 300 Amp. pro 1 m^2. Es bilden sich dann an der Kathode Silbernadeln, die immer mehr in den Elektrolyten hineinwachsen und schliesslich die Kathode mit der Anode verbinden (Kurzschluss). Die Entstehung von Kurzschlüssen wird durch Abstossen der Nadeln verhindert (fahrbarer Rahmen mit Hölzern, die in das Bad tauchen). Als Elektrolyt dient eine schwache, angesäuerte Lösung von Silbernitrat. Während des Betriebes reichert sich das Bad an Kupfer an, das in geringer Menge in der Legierung enthalten ist. Mit steigendem Kupfergehalt wird der Salpetersäurezusatz vermehrt und die Stromdichte bis zu etwa 200 Amp. per 1 m^2 vermindert. Die Badspannung beträgt 1,4—1,5 Volt.

c) Gold. Bei der Gewinnung des Goldes mittels des elektrischen Stromes ist, wie bei dem Silber, zu unterscheiden zwischen Elektrolyse unter Zurücklassung des Goldes an der Anode und zwischen Elektrolyse unter Lösung und Wiederausfällung des Goldes. Lösungsmittel für Gold sind chlor-

---

schmolzen, so bilden sich bei der Abkühlung Bleikrystalle; werden diese entfernt, so bleibt eine silberreichere Legierung zurück.

Setzt man dem geschmolzenen Werkblei Zink zu, so bildet sich eine Zink-Blei-Silberlegierung, deren Schmelzpunkt höher liegt als derjenige des Bleis. Erstere erstarrt also zuerst und sammelt sich an der Oberfläche und bildet den sogen. Zinkschaum.

haltige Flüssigkeiten und Cyankaliumlösung, zu der Sauerstoff Zutritt hat.

Wir beschränken uns auf die Beschreibung des von der Firma Siemens & Halske eingeführten Verfahrens, das als Cyanidprozess bezeichnet wird. Zur Lösung des Goldes in Cyankaliumlösung ist die Anwesenheit von Sauerstoff erforderlich:

$$2\,Au + 4\,KCy + H_2O + O = 2\,KCy\,AuCy + 2\,KHO.$$

Für den Cyanidprozess sind demgemäss nur solche Erze geeignet, die nicht Bestandteile enthalten, die als starke Reduktionsmittel die lösende Wirkung des teuren Cyankaliums aufheben.

Als solche sind Kupfer, Zinkverbindungen und organische Stoffe zu erwähnen. Ihre reduzierende Wirkung sucht man durch Anwendung chemischer Oxydationsmittel oder durch erhöhte Zuführung von Sauerstoff unschädlich zu machen.

Eine weitere Bedingung für den Prozess ist die Feinkörnigkeit des Goldes im Mineral. Die meisten Erze enthalten das Gold z. T. in Form von groben Körnern, deren Auflösung in der Lauge eine zu lange Zeit in Anspruch nehmen würde. Daher muss fast immer dem Cyanidprozess eine Amalgamation [1]) vorausgehen oder nachfolgen. Goldführende Pyrite bieten, wenn genügend feingepulvert, in der Regel bei der Extraktion durch Cyankalium keine Schwierigkeiten; bei vielen pyritischen Erzen ist ein Rösten vor der Cyanidbehandlung vorteilhaft.

Beim Auslaugen werden Cyankaliumlösungen mit einem Gehalt von 0,05—0,1 % benutzt. Der Laugeapparat besteht aus cylindrischen Bottichen aus Holz oder Stahlplatten; auf dem Boden liegt ein mit Kokosmatten bedeckter Holzrost, der als Filter dient. In der Regel ist in den pulverigen und schlammigen Massen, die ausgelaugt werden, schon genügend Sauerstoff vorhanden (s. die letzte Gleichung).

Die Ausscheidung des Goldes aus der Lösung wird durch den elektrischen Strom bewirkt. Als Anoden dienen Eisenplatten und als Kathoden (zur Aufnahme des Goldes) Blei-

1) Auflösung des Goldes in Quecksilber. Diesem Prozesse geht fast immer eine mechanische Aufbereitung voraus.

folie, die in Streifen geschnitten und in 3—4 facher Lage zwischen die Anoden gesetzt wird, um eine möglichst grosse Kathodenfläche zu erzielen. Die Platten befinden sich in einem langen, schmalen Holzkasten, der durch Querwände, die aber keinen vollständigen Abschluss bilden, in Abteilungen geteilt ist. Die goldhaltige Lösung tritt an einem Ende in den Kasten und durchläuft die Abteilungen in auf- und niedersteigender Bewegung. Das Gold wird durch den Strom als festhaftender Niederschlag auf dem Blei abgeschieden, das am Ende eines jeden Monats aus dem Apparat genommen und geschmolzen wird. Die goldhaltigen Bleibarren, die $^1/_2$—10 % Gold enthalten, werden durch Kupellation raffiniert.

Der Prozess hat besonders in Transvaal Anwendung gefunden, da dort die Bedingungen für seine Verwendung günstig sind.

d) Aluminium. Das Aluminium kommt in freiem Zustande in der Natur nicht vor. Von seinen chemischen Verbindungen sind zu erwähnen das Aluminiumoxyd (Al_2O_3), die Aluminiumsilikate (Feldspat, Ton), der Kryolith (Al_2Fl_6, 6 NaFl), der als ein Doppelsalz anzusehen ist, und der Bauxit.

Man gewinnt das Aluminium dadurch, dass man Aluminiumverbindungen, in den meisten Fällen ein Gemenge von Aluminiumoxyd und Kryolith (Flussmittel), mit Hülfe des elektrischen Stromes schmilzt und die erhaltene Flüssigkeit elektrolysiert. Das gelöste Aluminiumoxyd wird durch den Strom in Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Das Metall wird an der Kathode frei. Da Kohle als Kathodenmaterial nicht geeignet ist (Verunreinigung), so benutzt man als negative Elektrode kühlbare Metallplatten oder Metallstäbe oder flüssiges Metall; im letzteren Falle erhält man eine Aluminiumlegierung. In dem Maße, in dem während des Prozesses Al_2O_3 herauselektrolysiert wird, setzt man dieses Oxyd zu, so dass der Aluminiumgehalt der Lösung unverändert bleibt.

Da das Verfahren von Héroult für alle späteren in der Technik verwerteten Methoden vorbildlich gewesen ist, so soll nur dieses beschrieben werden. Der Schmelztiegel besteht

aus einem äusseren Eisenmantel *M* (Fig. 146)[1]) und aus einer Ausfütterung aus Kohlenplatten, die durch einen Kohlenkitt

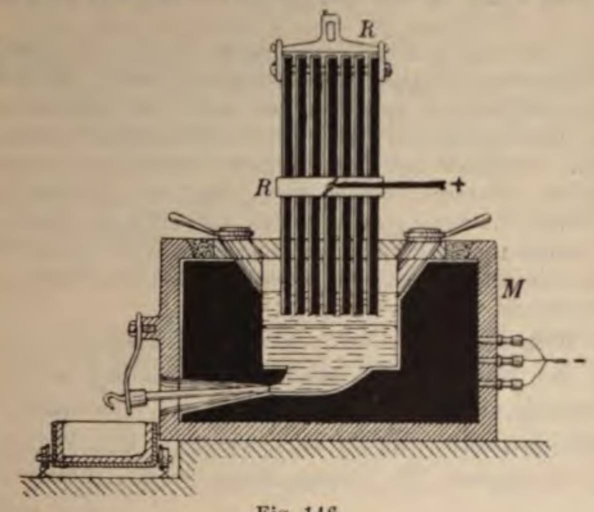


Fig. 146.

(z. B. Teer) miteinander verbunden sind. Die positive Elektrode besteht aus einem Bündel von Kohlenstäben, die durch Rahmenstücke *R* zusammengehalten werden. Man wirft zunächst kleine Kupferstücke auf den Boden des Tiegels und senkt die Elektrode herab, bis sie das Kupfer berührt. Der Strom fliesst von der positiven Elektrode nach dem Kupfer, durch die Kohlenwand zum Mantel und endlich durch Bolzen, die in die Eisenwand eingesetzt sind, zum Kabel. Ist das Kupfer geschmolzen, so wirft man Tonerde und das Flussmittel in den Tiegel und hebt die Elektrode etwas; das Gemenge wird geschmolzen und elektrolysiert. Da das geschmolzene Kupfer den negativen Pol bildet, so erhält man anfänglich Aluminiumbronze. Bei der Gewinnung im grossen arbeitet man mit Strömen, die viele Tausend Ampere stark sind.

Das Aluminiumoxyd wird nach verschiedenen Methoden gewonnen, von denen die Löwigsche erwähnt sei. Eine Mischung

1) Nach Borchers, Entwicklung, Bau und Betrieb der elektrischen Öfen.

von Soda und Bauxit wird geschmolzen; es entsteht Natriumaluminat $Na_2(AlO_2)$. Dieses wird mit Kohlensäure behandelt; es bildet sich Soda, die in Lösung geht, und Al_2O_3 schlägt sich nieder.

Von den zahlreichen Anwendungen, die das Aluminium wegen seiner Widerstandsfähigkeit gegen Sauerstoff, seines geringen spezifischen Gewichtes etc. gefunden hat, seien nur folgende erwähnt: 1. Als Leitungsmaterial bei Kraftübertragungen, besonders in Amerika. 2. Zusatz zu dem Siemens-Martin-Stahl (pro Tonne 60—120 g), wodurch erzielt wird, dass die Trichterbildung in den Blockköpfen verringert wird, das Aufwallen der geschmolzenen Masse weniger heftig erfolgt, die Homogenität der Gussstücke und die Zugfestigkeit erhöht, die Oxydierbarkeit des Stahls während des Vergiessens verringert wird.

c) Magnesium, Natrium. Das Magnesium findet sich in der Natur als Haloïdsalz (im Karnallit), als Karbonat (im Magnesit und Dolomit), als Sulfat etc. Gewonnen wird es aus dem Karnallit ($MgCl_2 . KCl, 6 H_2O$). Die Wärmezufuhr erfolgt von aussen, die flüssige Masse wird elektrolysiert.



Fig. 147.

Für einen Versuch in kleinem Maßstabe kann man eine Tonpfeife benutzen (Fig. 147). Den Kopf füllt man mit einem Gemenge aus 200 g Magnesiumchlorid, 7,5 g Kaliumchlorid und 3 g Ammoniumchlorid, schmilzt dieses und steckt durch das Pfeifenrohr eine Stricknadel, die man mit dem negativen Pole einer Batterie (10 bis 12 Volt) verbindet; die andere Elektrode besteht aus Bogenlampenkohle. Nach dem Erkalten findet man kleine Magnesiumkügelchen in der Salzmasse, der grösste Teil aber verbrennt bezw. vereinigt sich wieder mit Chlor.

Das Schmelzgefäss besteht bei den meisten Verfahren aus

Gussstahl, der zugleich als negative Elektrode dient. Als Anode benutzt man einen Kohlenstab, der von einem Porzellanrohr umgeben wird. Das Chlor steigt in dem Porzellanrohr in die Höhe und entweicht durch ein ausserhalb des Tiegels angebrachtes seitliches Ansatzrohr.

Die Gewinnung des Natriums aus seinen Salzen ist mit erheblichen Schwierigkeiten verknüpft. Die Elektrolyse einer Kochsalzlösung oder einer anderen in Wasser löslichen Verbindung führt nicht zum Ziele, da sich das entionisierte Natrium mit Wasser nach der Gleichung

$$Na + H_2O = NaOH + H$$

verbindet.

Man kann die Vereinigung des Na mit OH einschränken, indem man das Metall in dem Momente, in dem es abgeschieden wird, an ein anderes Metall (Quecksilber) bindet. Aus der Legierung gewinnt man später durch Destillation das Natrium.

Elektrolytisch wird Natrium dadurch gewonnen, dass man durch geschmolzene Natriumverbindungen — meistens benutzt man Kochsalz — einen Strom schickt. Der technischen Ausführung stehen verschiedene Schwierigkeiten im Wege. Chlornatrium schmilzt erst bei etwa 900°, bei dieser Temperatur liegt aber auch der Siedepunkt des Natriums, so dass das abgeschiedene Metall als Dampf entweichen würde. Durch Zusatz eines anderen Chlorids, besonders von Chlorkalium, wird der Schmelzpunkt erniedrigt [1]).

Durch die entweichenden Gase wird eine lebhafte Bewegung der Schmelze hervorgerufen. Wird durch die Bewegung Natrium in den Anoden- oder Chlor in den Kathodenraum befördert, so findet eine Wiedervereinigung der beiden Elemente statt. Dies muss natürlich tunlichst verhindert werden.

Am meisten Schwierigkeit macht die Apparatenfrage. Als Kathodenmaterial wählt man am besten Eisen, die Anode muss aus Kohle bestehen. Der Anodenraum soll eine leichte Abführung

1) Aus einer Mischung von NaCl und KCl kann man ziemlich reines Na gewinnen. Das Kalium wird, solange Natrium in genügender Menge vorhanden ist, nicht mitabgeschieden, da für seine Abscheidung eine höhere Zersetzungsspannung erforderlich ist. Dauert die Elektrolyse also längere Zeit, so muss das zersetzte Chlornatrium ersetzt werden.

des Chlors gestatten, das Material muss dem Angriffe des Halogens und der Salze Widerstand leisten. Der Kathodenraum muss Ansammlung und Abführung des Metalls gestatten; bei der Wahl des Materials ist zu berücksichtigen, dass das Natrium bei der hohen herrschenden Temperatur ein sehr starkes Reduktionsmittel ist. Die Verwendung von Ton, Porzellan und dergl. ist daher so gut wie ausgeschlossen.

Am meisten Verbreitung hat wohl das Verfahren von Castner gefunden. Castner elektrolysiert Natriumhydroxyd, also einen teuren Rohstoff, hat dafür aber den Vorteil, dass der Schmelzpunkt tiefer liegt und sich kein Chlor entwickelt. Das Schmelzgefäss (aus Eisen) verjüngt sich nach unten und läuft in ein Rohr aus. Die Kathode (Kohle) ragt von unten in das Gefäss hinein, geht also durch das Rohr hindurch. Um sie abzudichten und zu befestigen, wird der enge Teil des Gefässes mit flüssigem Natriumhydroxyd angefüllt. Da dem unteren Teile des Gefässes keine Wärme zugeführt wird, so erstarrt das NaOH und bleibt fest. Die Anode umgibt die Kathode als Rohr, das am Deckel befestigt ist. Die beiden Elektroden werden durch einen Drahtnetzcylinder voneinander getrennt (Diaphragma). An das Diaphragma schliesst sich nach oben ein Sammelrohr, in welchem Wasserstoff[1]) und Natrium getrennt vom Sauerstoff aufgefangen werden. Das flüssige Metall wird von Zeit zu Zeit nach Entfernung des Deckels ausgeschöpft.

Bei diesem Verfahren muss die Temperatur sorgfältig reguliert werden, weil bei zu hoher Temperatur das Natrium als Dampf entweicht und ausserdem die Ausbeute an Natrium kleiner ist.

f. Calciumcarbid, Siliciumcarbid, Graphit. Bei sehr hoher Temperatur verbinden sich die Metalle mit Kohlenstoff zu Carbiden. Von diesen verdient das Calciumcarbid besonderes Interesse. Der Beschreibung des Herstellungsverfahrens ist die Arbeitsweise der grossen Calciumcarbidfabrik in Meran zu Grunde gelegt[2]). Als Calciumverbindung kommt kohlensaurer Kalk ($CaCO_3$) zur Verwendung, der durch Brennen in Öfen in Calciumoxyd (CaO) umgewandelt wird. Dieses wird in Maschinen zerkleinert, ebenso die Kohle (Koks). Nach sorg-

1) Neben Metall entsteht, besonders bei Beginn der Elektrolyse, Wasserstoff.

2) Zeitschr. für Elektrochemie 1899—1900, S. 208, ferner siehe Ahrens, Die Metallcarbide und ihre Verwendung.

fältiger Vermischung werden die Rohprodukte den Schmelzöfen zugeführt. In diesen wird zwischen dem Schmelzgut und einer grossen Kohlenelektrode ein Lichtbogen hergestellt, in dem das Zusammenschmelzen von Kalk und Kohle nach der Gleichung

$$CaO + 3C = CaC_2 + CO$$

erfolgt. In der Stirnwand des Ofens befinden sich Öffnungen, durch die man das flüssige Carbid ablässt.

Da sich die Abstichöffnungen nach Verlauf von einigen Arbeitstagen verstopfen, so befindet sich in jedem Ofen ein herausnehmbarer Eisenbehälter. Haben sich die Löcher verstopft, so lässt man den Behälter sich ganz mit flüssigem Carbid füllen und hebt ihn aus dem Ofen heraus.

Die Betriebsstromstärke pro Ofen beträgt 6000 Amp. bei 33 Volt Spannung. Für die Erzeugung selbst sind 6,4 Pferdekraftstunden pro 1 kg erforderlich (abgesehen also von der Energie, die von den Arbeitsmaschinen verbraucht wird). Daher ist die Herstellung nur lohnend, wenn billige Betriebskräfte ausgenutzt werden (z. B. Wasser, überflüssige Hochofengase).

Die wichtigste Anwendung, die das CaC_2 findet, ist die Herstellung des Acetylengases (C_2H_2), das sich bildet, wenn man auf Calciumcarbid Wasser giesst. Der chemische Umsatz erfolgt nach der Gleichung

$$CaC_2 + H_2O = C_2H_2 + CaO.$$

1 kg Carbid liefert 280—300 Liter Acetylengas. Wegen seines grossen Kohlenstoffgehaltes brennt das Gas mit weisser, intensiv leuchtender Flamme. Man benutzt das Acetylen auch zur technischen Gewinnung von Russ.

Das Calciumcarbid findet auch technische Verwertung für die Herstellung von Alkalicyaniden und Cyaniden der alkalischen Erden sowie von Cyanamiden.

Siliciumcarbid oder Carborundum (Schleif- und Poliermaterial) wird ebenfalls in grossem Maßstabe auf elektrischem Wege hergestellt (hauptsächlich in Amerika). Man leitet den Strom durch ein Gemenge aus Retortenkohle, Sand (oder Glaspulver) und Kochsalz. Das Siliciumcarbid wird aus dem Schmelzgut durch eine Reihe von chemischen Operationen getrennt.

Graphit. Ein Gemenge von Holzkohle oder Koks und Oxyden oder Sulfiden solcher Basen, die Carbide zu bilden im stande sind, wird durch den elektrischen Strom so stark erhitzt, dass die zuerst entstandenen Carbide durch Verflüchtigung der betreffenden Metalle in Graphit umgewandelt werden.

5. **Elektrische Bleicherei.** Die Bleichverfahren mit Hülfe des elektrischen Stromes kann man in drei Gruppen einteilen, nämlich in solche, bei denen Ozon Verwendung findet (siehe S. 269), in solche mit Chlorkalk, den man dadurch erhält, dass man das bei anderen Verfahren gewonnene Chlor in Kalkmilch leitet, und in solche mit Hypochloritlaugen. Mit dem letzten Verfahren wollen wir uns zunächst beschäftigen [1]).

Die unterchlorige Säure ClOH ist nur in wässeriger Lösung bekannt. Die Lösung zersetzt sich leicht im Lichte; sie wirkt stark oxydierend und bleichend. Die bleichende Wirkung ist zurückzuführen auf die Ausscheidung von Sauerstoff im Entstehungszustande:

$$2\,ClOH = 2\,HCl + 2\,O.$$

Leitet man in kalte Ätznatronlösung Chlor, so bildet sich Natriumhypochlorit (NaOCl), Kochsalz und Wasser:

$$2\,NaOH + Cl_2 = NaCl + NaOCl + H_2O.$$

Die Salze der unterchlorigen Säure wirken ebenfalls stark bleichend.

Man gewinnt Bleichlauge (Hypochlorite, NaOCl) durch Elektrolyse einer Kochsalzlösung. An der Anode entsteht bei etwa 2 Volt Natriumhydroxyd (NaOH), an der Kathode Chlor.

In einer Kochsalzlösung befinden sich folgende Ionen: $\overset{+}{Na}$, $\overset{+}{H}$, $\overset{-}{Cl}$, $\overset{-}{OH}$, $\overset{=}{O}$. Vielfach wird angenommen, dass sich bei der Elektrolyse an der Kathode die Natriumionen entladen und dass sich die Natriumatome mit Wasser verbinden unter Bildung von Wasserstoff und NaOH. Da sich nun das NaOH dissoziiert nach der Gleichung

$$NaOH = \overset{+}{Na} + \overset{-}{OH},$$

[1]) Über diesen Gegenstand sind eine grosse Reihe von Arbeiten erschienen. Eine Zusammenstellung derselben findet man in Danneel, Spezielle Elektrochemie (Handbuch der Elektrochemie), Lieferung II. Hingewiesen sei auf: Abel, Hypochlorite und elektrische Bleiche. Theoret. Teil (Monographien über angewandte Elektrochemie).

so ist es einfacher (und mehr berechtigt), anzunehmen, dass sich an der Kathode die $\overset{+}{\mathrm{H}}$-Ionen abscheiden, $\overset{-}{\mathrm{OH}}$-Ionen also zurückbleiben. Die Natriumionen sind wie alle vorhandenen Ionen an der Stromleitung beteiligt; sie wandern nach der Kathode und bilden dort mit OH-Ionen Natriumhydroxyd.

Berücksichtigt man, dass Chlor in NaOH-Lösung Natriumhypochlorit [1]) bildet, so sieht man ein, dass bei der Elektrolyse NaClO entstehen wird.

Die Spannung beträgt anfänglich rund 2 Volt; nachdem sich Natronlauge gebildet hat, steigt sie auf 2,1—2,3 Volt.

Ausser Hypochlorit entsteht in der Lösung Chlorat ($NaClO_3$) und Perchlorat ($NaClO_4$). Das Chlorat entsteht wahrscheinlich durch Umwandlung des vorhandenen Hypochlorits.

Der in Figur 148 abgebildete Apparat dient dazu, die bleichende Wirkung der durch Elektrolyse einer Kochsalzlösung entstandenen Lauge zu demonstrieren. (Nach Lüpke-Rüdorff.) Auf die zur Anode bestimmte Kohlenplatte spanne man ein Stück roten Kattuns. Als Elektrolyt wird eine Lösung empfohlen, die auf 1 Liter Wasser 50 g Kochsalz, 5 g Magnesiumchlorid und einige Tropfen Chlorwasserstoffsäure enthält. Bei 4—6 Volt wird in kurzer Zeit der rote Stoff völlig gebleicht.

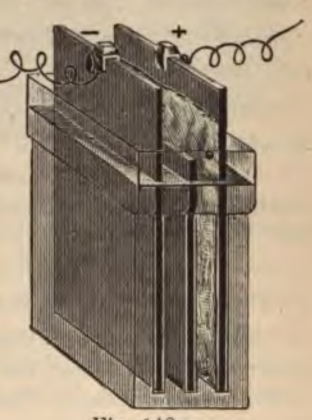


Fig. 148.

In der Praxis benutzt man Apparate ohne Diaphragma, da eine Vermischung der Anoden- und Kathodenflüssigkeit erwünscht ist. Als Elektroden verwendet man kohleähnliche Platten [2]) oder Platiniridium oder Platin auf der Anoden- und Zink auf der Kathodenseite.

---

1) Die Bildung von Hypochlorit kann (nicht nur rein chemisch, sondern) auch folgendermaßen erfolgen: an der Kathode wird Sauerstoff entionisiert, der sich mit einem Chlorion zu $\overline{\mathrm{ClO}}$ verbindet: $\overline{\mathrm{Cl}} + \overline{\overline{\mathrm{O}}} + 2\oplus = \overline{\mathrm{ClO}}$.

2) Kohlenanoden, auch aus bester Kohle, werden unter Bildung von Kohlensäure angegriffen. Danneel l. c. S. 148.

Eine andere Methode der Bleicherei beruht darauf, dass Chlor, das sich bei der Elektrolyse der Alkali- und Erdalkalichloride bildet, in Kalkmilch geleitet wird; es bildet sich dann Bleichkalk nach der Gleichung

$$\underset{\text{Gelöschter Kalk}}{2\,Ca(OH)_2} + 2\,Cl_2 = \underset{\text{Bleichkalk}}{Ca(OCl)_2} + \underset{\text{Calciumchlorid.}}{CaCl_2} + 2\,H_2O.$$

Anwendung findet die Bleicherei in Papier- uud Cellulosefabriken sowie in der Textilbranche.

Die Elektrolyse der Alkalichloride wird technisch noch verwertet zur Gewinnung von Ätzalkali (z. B. Ätznatron), von Chlorgas bezw. Chlorkalk, von Soda und Chloraten. Die Soda (Na_2CO_3, Natriumcarbonat) gewinnt man aus dem bei der Elektrolyse von Kochsalz entstandenen Hydroxyd ($NaOH$) durch Behandlung mit Kohlensäure.

6. **Ozon und seine Verwendung.** Das Molekül des Ozons besteht aus 3 Atomen (das Molekül des gewöhnlichen Sauerstoffs aus 2 Atomen) Sauerstoff. Von diesen ist das eine Atom nur locker gebunden, so dass also das Ozon eine unbeständige Verbindung ist, d. h. es wirkt stark oxydierend. Auf dieser Eigenschaft beruht seine Verwendung in der Praxis.

Zur Erkennung (Nachweis) des Ozons dient gewöhnlich eine Stärkelösung, in der sich einige Tropfen Jodkalium befinden. Leitet man Ozon ein, so wird Jod ausgeschieden:

$$2\,KJ + O_3 = O_2 + K_2O + J_2.$$

Durch Jod wird die Stärkelösung blau gefärbt.

Statt der Lösung benutzt man bequemer Streifen von Jodkalium-Kleister-Papier. Die Zeit, in der ein solcher Streifen blau gefärbt wird, dient als Maß für den Ozongehalt (Ozonometer von Schönbein).

Da das Ozon alle organischen Substanzen angreift, auch Kautschuk, so müssen die zur Ozondarstellung dienenden Apparate ohne Kautschuk (Gummischläuche) zusammengesetzt werden.

Ozon bildet sich bei der Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure; günstig für die Ozonbildung sind höhere Konzentration und grosse Stromdichte an der Anode. Wahrscheinlich entsteht das Ozon dadurch, dass $\overline{HSO_4}$-Ionen herauselektrolysiert werden, die mit Wasser nach der Gleichung

$$6\,HSO_4 + 3\,H_2O = 6\,H_2SO_4 + O_3$$

reagieren.

Ozon entsteht bei jeder elektrischen Entladung, mag sie in Gestalt eines Funkens oder als Büschel- oder als Glimmentladung erfolgen. Von technischer Bedeutung ist die Darstellung des Ozons durch die sogenannte stille elektrische Entladung. Bereits im Jahre 1857 hat W. Siemens einen Apparat konstruiert, um Ozon in grösserer Menge zu erzeugen. Er besteht aus zwei ineinander gesteckten dünnwandigen Glasröhren (*a* und *b* in Fig. 149), von denen die äussere eine Zu- und Abflussröhre für Luft bezw. Sauerstoff hat. Die engere

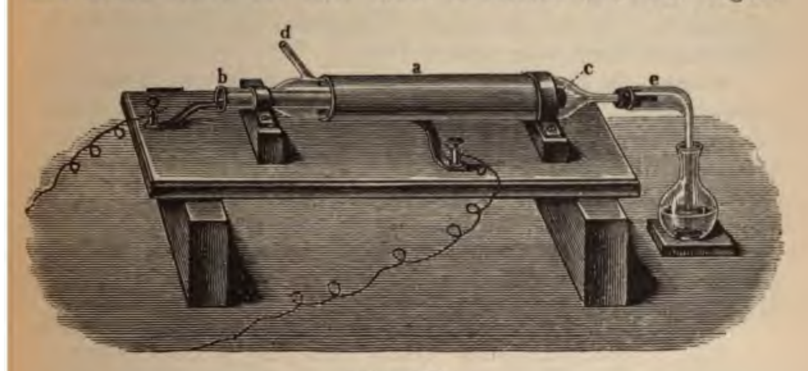


Fig. 149.

Glasröhre ist auf der Innenseite, die weitere auf der Aussenseite mit Stanniol belegt. Auf diese Weise wird verhindert, dass eine direkte Berührung zwischen Metall und Ozon stattfindet (Oxydation) und Funkenentladung erfolgt. Der Apparat ist also ein Kondensator, dessen Dielektrikum z. T. aus Glas, z. T. aus Luft gebildet wird. Man lässt durch den Zwischenraum zwischen den Röhren getrocknete Luft oder Sauerstoff streichen und verbindet die beiden Belegungen mit einer Wechselstromquelle von hoher Spannung oder mit den sekundären Klemmen eines Induktionsapparates. Unter gleichzeitig auftretender Glimmentladung[1]) wird ein Teil des Sauerstoffes „aktiviert".

1) Man kann annehmen, dass die von der Luft berührten Glaswände durch Influenz positiv bezw. negativ geladen werden, und diese Elektrizitäten sich im Zwischenraume ausgleichen.

Von den technischen Apparaten seien folgende erwähnt: der Apparat von **Babo** besteht aus einer grösseren Anzahl von dickwandigen Glasröhren; jede derselben umschliesst einen Platindraht, der als Belegung eines Kondensators anzusehen ist. Die zu Bündeln vereinigten Röhren werden von einer grösseren Glasröhre eingeschlossen, durch die Luft geblasen wird. Die eine Hälfte der Platindrähte wird mit dem positiven Pole der Stromquelle, die andere mit dem negativen Pole verbunden. Es entsteht so eine grössere Anzahl von parallel geschalteten Kondensatoren.

Der Apparat von **Andreoli** ist ein **Plattenapparat**; die eine Elektrode besteht aus einer Aluminiumplatte, die andere aus einer mit Spitzen bedeckten Gitterplatte aus Aluminium. Als Dielektrikum dient sehr dünnes Glas.

Siemens & Halske bauen für den technischen Grossbetrieb Röhrenapparate mit nur einer dielektrischen Schicht. Ein Metallrohr, das durch hindurchfliessendes Wasser gekühlt wird, befindet sich innerhalb eines Cylinders aus Glimmer. Die Luft streicht durch den Zwischenraum zwischen Rohr und Cylinder. Letzterer ist auf der Aussenseite mit Stanniol belegt. Dieses und das Metallrohr bilden die Elektroden. Eine grössere Anzahl solcher Rohre wird zu einem sogen. Rohrgitter vereinigt. Der Apparat wird mit Wechselstrom von 6000 Volt betrieben.

Die Verwendung des Ozons für die **Trinkwasserreinigung** beruht darauf, dass Ozon auf Bazillen rasch tötend wirkt. Das ev. durch einen Schnellfilter von Schwebeteilchen[1]) befreite Wasser gelangt in den Sterilisations- oder Ozonturm. Dort fällt es als feiner Regen in einen Raum, der mit faustgrossen Steinen angefüllt ist. Die ozonisierte Luft tritt unten in den Turm ein und begegnet dem Wasser, das ihm eine grosse Oberfläche darbietet.

Bei der von der Firma Siemens & Halske[2]) ausgeführten Versuchsanlage in **Martinikenfelde**, in der Spreewasser (also schlechtes Wasser) gereinigt wird, beträgt der Ozonverbrauch pro 1 m^3 Wasser 2,5 g.

---

1) Befinden sich in dem zu sterilisierenden Wasser oxydierbare Stoffe, so werden, wenn Ozon eingeleitet wird, in der Regel zuerst alle Oxydationen vorgenommen und dann erst die Bazillen getötet.

2) Trinkwasserreinigung durch Ozon. Von Dr. G. **Erlwein**. **Schillings** Journal 1901, Nr. 30 und 31.

1 PS-Stunde liefert etwa 30 g Ozon. — Das aus dem Turme kommende Wasser enthält noch etwas Ozon; dieses soll sich jedoch in ganz kurzer Zeit zersetzen. — Grössere Verbreitung hat das Verfahren nicht gefunden.

Ferner findet das Ozon Verwendung für die Bleicherei von Leinengarn und Tuchen als Ersatz für die Rasenbleiche. Man bringt die Ware in schwach feuchtem Zustande in die Ozonkammer (Raum mit ozonisierter Luft), wo sie einige Stunden verbleibt, und dann in schwache Chlorkalkbäder.

Durch Einleiten von ozonisierter Luft in Kaliummanganatlösung (K_2MnO_4) stellt die Firma Fr. Bayer & Co. Kaliumpermanganat ($KMnO_4$) dar:

$$2\,K_2MnO_4 + O_3 = 2\,KMnO_4 + K_2O + O_2$$

Im Verein mit Chlorgas dient Ozon zum Bleichen und Desorodisieren von Kartoffelstärke.

Endlich seien die Verwendung des Ozons zur Herstellung von rasch trocknenden Firnissen, zum künstlichen Altern von Kognak und anderen Spirituosen, in der Parfüm- und Obstweinfabrikation erwähnt.

7. Industrielle Ausbeutung des Stickstoffs der Luft[1]). Stickstoff bildet einen wichtigen Baustoff der Pflanzen. Bei intensivem landwirtschaftlichen Betriebe muss dem Boden gebundener Stickstoff entweder in Form von Nitraten oder von Ammoniaksalzen zugeführt werden. Die deutsche Landwirtschaft zahlt für stickstoffhaltige Düngemittel etwa 100 Millionen Mark an das Ausland.

Man kann auf elektrischem Wege Stickstoff in Salpetersäure bezw. in Nitrate oder Nitrite überführen, indem man nämlich unter Einwirkung der Elektrizität (Funken, Lichtbogen) den Stickstoff der Luft zur Verbindung mit dem ebenfalls in der Luft vorhandenen Sauerstoff zwingt — Bildung von NO_2. In Norwegen sind seit einigen Jahren Versuche in grossem Maßstabe ausgeführt worden, und es hat sich im Grossbetriebe ein von Prof. Birkeland ausgearbeitetes Verfahren bewährt. Es werden in einem Ofen kühlbare Elektroden zwischen den

1) Elektrot. Anz. 1905, S. 1273.

Polen eines starken Elektromagnets angeordnet; ihr Abstand beträgt 1—2 mm. Den Elektroden wird Wechselstrom von 5000 Volt zugeführt; man erhält einen grossen, scheibenförmigen Lichtbogen von grosser Stabilität. In den Ofen werden grosse Luftmassen geleitet. Die abziehenden Gase gelangen in Türme, in denen die Stickstoffsauerstoffverbindungen (NO_2) von Wasser absorbiert und in Salpetersäure umgewandelt werden.

Die erste Salpeterfabrik wurde in Notodden gebaut und im Jahre 1905 eröffnet. Man gewinnt dort Salpetersäure, Calciumnitrat und Calciumnitrit. Ersteres Salz ist ein vollständiger Ersatz für den Chilisalpeter.

Da die zur Verwendung kommende Kraft billig sein muss, kommen mit Steinkohlen betriebene Dampfmaschinen gar nicht in Betracht, sondern nur Wasserkräfte.

Sechzehntes Kapitel.

Elektrizität in Gasen.

Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen hat man den Gasentladungen, d. h. der Bewegung der Elektrizität in Gasen[1]), erhöhte Aufmerksamkeit zugewendet. Die Erforschung dieses Gebietes durch zahlreiche Physiker hat zu ungeahnten Resultaten geführt. Vor allem hat sich ergeben, dass die Gasentladungen in das Gebiet der Elektrochemie (s. Kap. 14) gehören, indem nämlich die Bewegung der Elektrizität in Gasen in derselben Weise erfolgt wie in Elektrolyten. Das Studium der Gasent-

1) Von den zahlreichen Werken und Schriften seien nur folgende (in diesem Kapitel verwertete) hervorgehoben: 1) Die Kathodenstrahlen von G. C. Schmidt, 1904. 2) Die Elektrizität in Gasen von Dr. Joh. Stark, 1902. 3) Die Entladung der Elektrizität durch Gase von J. J. Thomson, 1900.

ladungen hat ferner zu neuen Vorstellungen über das Wesen der Elektrizität überhaupt und — was den Fernstehenden am meisten in Erstaunen setzen dürfte — zu neuen Anschauungen über das Wesen der Materie geführt.

Zunächst sollen die verschiedenen Arten der Elektrizitätsleitung in Gasen aufgezählt werden. Nach Stark (l. c. Seite 118) hat man zu unterscheiden zwischen selbständigen und unselbständigen Strömungen. Erstere erfolgen erst dann, wenn eine bestimmte Potentialdifferenz hergestellt ist; sie sind von äusseren Faktoren unabhängig. Hierher gehören die Funkenentladung, von der später die Rede sein wird, die Spitzenentladung (Ausströmen der Elektrizität aus Spitzen, wenn diese gegen die Umgebung auf eine gewisse Potentialdifferenz geladen sind), die Entladung in verdünnten Gasen (s. Geisslersche Röhren) und der Lichtbogen (s. Beleuchtung). Bei den unselbständigen Strömungen ist die Mitwirkung äusserer Faktoren (Temperatur, ultraviolette Strahlen, Röntgen- oder Becquerelstrahlen) erforderlich. Verbindet man z. B. zwei Metallplatten, die sich in kleinem Abstande gegenüberstehen, mit den Polen einer Stromquelle, so fliesst zunächst keine Elektrizität durch die Luftschicht. Bestrahlt man diese aber mit Röntgenstrahlen, so kommt ein Strom zustande.

1. Vorstellung über die Bewegung der Elektrizität in Gasen. „Eine der auffallendsten Erscheinungen ist die Schwierigkeit, einem Gase in seinem normalen Zustande eine elektrische Ladung direkt mitzuteilen" (J. J. Thomson, l. c. S. 2). Eine elektrisch geladene Metallplatte z. B. möge so gut isoliert sein, dass durch ihre Träger keine Elektrizität abgeleitet wird; die Platte möge bei gewöhnlicher Temperatur mit Luft oder einem anderen Gase in Berührung stehen und vor ultraviolettem Licht etc. geschützt sein: dann zeigen unsere sorgfältigsten Experimente, dass unter diesen Umständen die Platte absolut keinen Verlust ihrer Ladung erleidet. Noch auffallender ist die Tatsache, dass der Dampf, der von einer elektrisierten Flüssigkeit aufsteigt, vollkommen frei von irgendwelcher elektrischen Ladung ist. Dies gilt auch für den Dampf, den

siedendes Quecksilber entsendet. Eingehende Untersuchungen, besonders von J. J. Thomson und seinen Schülern ausgeführt, ergaben, dass ein Gas nur dann die Elektrizität leiten kann, wenn sich in ihm Ionen befinden. Diese können entweder von vornherein in dem Gase zugegen sein (fremde Ionen), oder sie werden aus Molekülen des betreffenden Gases erzeugt. Eine Ursache, die eine Zerlegung (Dissoziation) neutraler Gasteilchen in elektrisch geladene Partikelchen bewirkt, heisst Ionisator. Wird z. B. die Temperatur eines Gases erhöht, so werden die Schwingungen der im Moleküle gebundenen Ionen (Elektronen) lebhafter, der Abstand der Teilchen kann so gross werden, dass sie den Neutralverband verlassen. Ferner kann Ionisierung durch Ionenstoss erfolgen. Nehmen wir an, dass sich ein Gas in einem starken elektrischen Felde befindet und dass schon Ionen vorhanden sind [1]). Durch die elektrischen Kräfte (elektrostatische Anziehung bezw. Abstossung) wird den Ionen eine grosse Geschwindigkeit erteilt. Auf ihrem Wege stossen sie mit neutralen Molekülen zusammen; hat ein Ion in der dem Zusammenstosse voraufgehenden Zeit eine grosse lebendige Kraft angesammelt, so können die im neutralen Teilchen enthaltenen, gebundenen Ionen, das positive und das negative, soweit auseinander getrieben werden, dass sie sich aus ihrem neutralen Atomverband lösen und frei werden.

Die Bewegung der Elektrizität in Gasen erfolgt nun in ganz analoger Weise wie diejenige in Elektrolyten.

Lässt man Röntgenstrahlen auf ein geladenes Elektroskop fallen, so wird dieses schnell entladen. Durch die Röntgenstrahlen wird die Luft in der Nähe des Elektroskops ionisiert. Ist das Elektroskop positiv geladen, so werden die negativen Ionen angezogen und an diese Ladung abgegeben.

Auch ultraviolette Strahlen können ionisierend wirken. Da das Sonnenlicht solche Strahlen enthält, so erklärt es sich, dass sich in der atmosphärischen Luft immer Ionen befinden (s. auch Radium). „Von der ionisierenden Wirkung ist eine andere Wirkung [illegible] speziell des ultravioletten, nämlich die lichtelektrische [illegible] ng wohl zu unterscheiden" (Stark l. c. S. 76). Sie

[illegible] eringe Anzahl von Ionen befindet sich auch bei gewöhn- [illegible] r in einem Gase.

besteht darin, dass durch Lichtstrahlen aus der Grenzfläche eines Körpers (Zinkplatte), negative (nicht auch positive) Ionen frei gemacht und in die Luft der Umgebung gehoben werden. Ein negativ geladener Körper verliert also seine Ladung, wenn auf ihn ultraviolette Strahlen fallen. Man kann dies mittels einer Bogenlampe und eines Elektroskops leicht nachweisen.

2. Geisslersche Röhren sind Glasröhren beliebiger Form, die Gase in stark verdünntem Zustande enthalten. In die Röhre ragen an beiden Enden Platindrähte hinein, die in vielen Fällen kleine Scheiben aus Aluminium tragen; man nennt sie die Elektroden (s. Fig. 150). Verbindet man die Elektroden mit den Polen einer Stromquelle von grosser elektromotorischer Kraft, z. B. mit den sekundären Klemmen eines Funkeninduktors, so leuchten die Röhren in herrlichem Lichte. Die Erscheinungen wechseln mit dem Gase, mit der Weite der Röhre und mit der Stromstärke. Von der positiven Elektrode, der Anode, geht rötliches, oft geschichtetes Licht aus, das sich meistens weit in die Röhre hinein erstreckt, dann folgt ein dunkler Raum. Auf der Kathode bemerkt man zunächst eine dünne Schicht rötlich gelben Lichtes, an diese schliesst sich ein dünner, dunkler Raum, der dunkle Kathodenraum, und dieser wird von dem negativen (blauen) Glimmlicht bedeckt.



Fig. 150.

Der Glimmlicht-Oszillograph System Dr. Gehrke-Ruhmer besteht aus einer Geisslerschen Röhre mit langen, drahtförmigen Elektroden (Fig. 151). Die Wirkungsweise dieses Apparates beruht auf der Tatsache, dass die Länge des Glimmlichthäutchens, mit dem die Kathode bedeckt ist, proportional ist der Stärke des

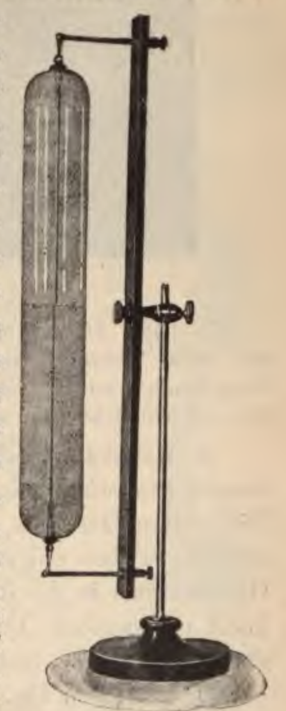
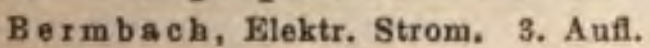


Fig. 151.



durch die Röhre fliessenden Stromes. Durch den Apparat fliesse nun hochgespannter Wechselstrom mit der Periode τ. Während der Zeit 0 bis $\frac{\tau}{2}$ sei die obere Elektrode Kathode. Die Länge der Glimmlichtschicht wächst von Null bis zu einem Maximum und nimmt dann wieder bis Null ab. Nach Verlauf der Zeit $\frac{\tau}{2}$ wird die untere Elektrode Kathode etc. Betrachtet man nun die Röhre in einem rotierenden (oder oszillierenden) Spiegel, dessen Drehungsachse parallel zur Röhrenachse läuft, so entspricht jeder Phase (jedem Momente) ein Bild, und zwar liegen die einzelnen Bilder unmittelbar nebeneinander. Die Endpunkte der Glimmlichtbilder bilden eine Kurve, die den Verlauf des Wechselstromes anzeigt



Fig. 152.

(s. Fig. 152). Um die nötige Spannung zu erzeugen, bedient man sich eines Transformators oder eines Induktionsapparates, dessen Unterbrecher ausser Betrieb gesetzt ist. Mit dem Apparate lassen sich verschiedene sehr schöne Versuche ausführen.

3. **Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen.** Die eben beschriebenen Erscheinungen beobachtet man schon bei einigen Millimetern Gasdruck. Wird die Luftverdünnung weiter getrieben, so dass nur noch $^1/_{100}$—$^1/_{1000}$ Prozent des anfänglichen Gasquantums in der Röhre zurückbleibt, so wird das positive Licht unscheinbar. Das negative Licht dehnt sich auf Kosten des positiven aus, und es gehen von der Kathode höchst merkwürdige Strahlen aus. Die Erscheinungen, die im folgenden beschrieben werden, wurden von Hittorf und Crookes

eingehend studiert und als Eigentümlichkeiten eines vierten Aggregatzustandes beschrieben, den Crookes strahlende Materie nannte.

Die von der Kathode ausgehenden, senkrecht zu ihrer Oberfläche stehenden Strahlen sind an und für sich unsichtbar, sie können aber das Gas, das sie durchdringen, zum Leuchten veranlassen. An den Stellen, wo die Strahlen auf die Glaswand fallen, leuchtet das Glas in apfelgrünem Lichte — Fluoreszenz[1]). Ausser Glas gibt es noch eine ganze Reihe von Substanzen, besonders Calciumverbindungen, die Fluoreszenzlicht aussenden, wenn sie von Kathodenstrahlen getroffen werden.

Die Kathodenstrahlen sind nicht imstande, die Glaswand zu durchdringen; will man sie aus der Röhre herauslocken, so muss man ein sehr dünnes Metallblättchen (Aluminium) in die Glaswand einsetzen (Hertz, Lenard). Die durch ein solches Fenster gedrungenen Strahlen rufen in den angrenzenden Luftschichten ein schwaches Leuchten hervor, sie machen die Luft leitend (wirken ionisierend) und wirken auf die photographische Trockenplatte wie die Lichtstrahlen ein.

Während das Licht in den Geissler-Röhren allen Krümmungen des Entladungsgefässes folgt, pflanzen sich die Kathodenstrahlen nur geradlinig fort. Man kann dies mit Hülfe der in Fig. 153 abgebildeten Röhre zeigen. Ist K Kathode, so fluoresziert immer die K gegenüberliegende Stelle der Glaswand, mag man a_1 oder a_2 als Anode benutzen.



Fig. 153.

Körper, die von den Kathodenstrahlen getroffen werden, erwärmen sich und werden unter Umständen glühend. Man weist dies mittels einer Crookes-Röhre nach, deren Kathode einen Hohlspiegel trägt. Die Kathodenstrahlen gehen alle nach dem Mittelpunkte der

1) Man nennt solche Körper, die unter dem Einflusse auffallender Strahlen selbstleuchtend werden, fluoreszierende Körper, die Erscheinung selbst Fluoreszenz. Bei Glas hängt die Farbe des Fluoreszenzlichtes von der Zusammensetzung des Glases ab.

Kugelschale hin, werden also dort konzentriert. In der Nähe ihres Vereinigungspunktes befindet sich ein dünnes, von einem Glasstäbchen getragenes Platinblech; dieses wird, wenn man einen grösseren Induktionsapparat benutzt, weissglühend — thermischer Effekt.

Leichte und leicht beweglich angeordnete Körperchen im Innern der Röhre erhalten durch Kathodenstrahlen, die auf sie fallen, einen Bewegungsantrieb; so z. B. rotiert ein leichtes Flügelrädchen (s. Fig. 154), wenn die Strahlen entweder nur

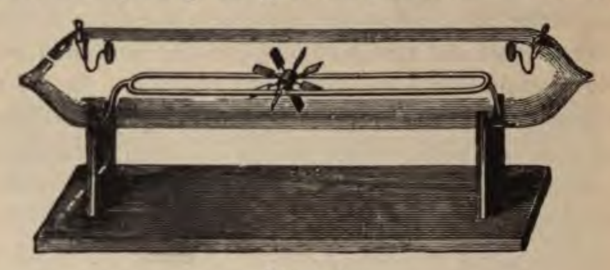


Fig. 154.

die oberen oder nur die unteren Flügel treffen. Kathodenstrahlen üben also mechanische Wirkungen aus.

Endlich haben unsere Strahlen die höchst beachtenswerte Eigenschaft, dass sie durch magnetische und elektrische Kräfte abgelenkt werden. Um die Ablenkung im magnetischen Felde zu zeigen, benutzt man den in Fig. 155 abgebildeten Apparat.

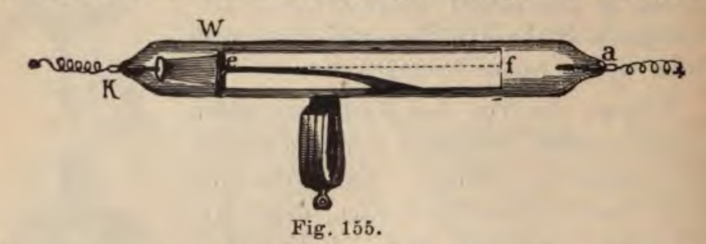


Fig. 155.

Die von der scheibenförmigen Kathode *K* ausgehenden Strahlen treffen einen undurchdringlichen Schirm *W*, in dem sich ein horizontaler Spalt befindet. Hinter dem Schirme ist eine vertikale, etwas schräg zur Röhrenachse stehende Blechscheibe aufgestellt, die mit einer blau fluoreszierenden Substanz be-

strichen ist. Das Kathodenstrahlenbündel trifft den Schirm, und man sieht eine blaue Linie *ef*. Auf diese Weise wird der Weg der Strahlen sichtbar gemacht. Nähert man der Röhre einen Magnetpol (von der Seite, in der Nähe der Wand *W*), so sieht man, dass der Fluoreszenzstreif sich krümmt. (Die Ablenkung erfolgt nach der auf S. 97 angegebenen Regel.)

Die Braunsche Röhre bildet ein wichtiges Hülfsmittel bei der Untersuchung von Wechselströmen. *K* in Figur 156

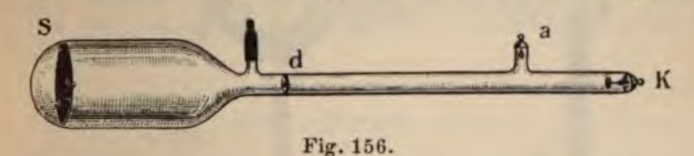


Fig. 156.

macht man zur Kathode[1]), *a* zur Anode (oder verbindet *a* mit der Erde). Die Kathodenstrahlen fallen auf das Diaphragma *d*, in dem sich ein kleines rundes Loch befindet. Das durch das Loch gegangene dünne Kathodenstrahlenbündel fällt auf den mit fluoreszierender Farbe überzogenen Glimmerschirm *S* und erzeugt dort einen kleinen hellen Kreis, den man auch dann sieht, wenn man hinter der Röhre (links von *S*) steht. Schiebt man an die Röhre (zwischen *d* und *S*) eine kleine Magnetisierungsspule, so wird der Kreis abgelenkt. Benutzt man Wechselstrom, so wird der Fleck in synchrone Schwingungen versetzt, er bewegt sich auf einer Geraden, senkrecht zur Achse der Spule, auf- und abwärts. Stellt man hinter der Röhre einen rotierenden Spiegel so auf, dass seine Drehungsachse parallel läuft der Lichtlinie, so löst sich der Lichtfleck in eine Kurve auf, man erhält ein Bild der Stromkurve. Um die Spannungskurve zu erhalten, bedient man sich einer Braunschen Röhre, hinter deren Diaphragma ein Kondensator, bestehend aus zwei in die Röhre hineinragenden Metallplatten, angeordnet ist. Das Strahlenbündel geht durch den Zwischenraum zwischen den beiden mit der Wechselstromleitung verbundenen Platten hindurch.

---

1) Als Stromquelle benutzt man am besten eine Influenzmaschine, ein Funkeninduktor mit Platinunterbrecher ist nicht geeignet.

Für Drehfeldversuche benutzt man die in Figur 157 abgebildete Anordnung. Da die Ablenkung des Lichtpunktes senkrecht zu den Kraftlinien erfolgt und letztere rotieren, so



Fig. 157.

rotiert auch der Lichtpunkt, wenn man die drei Klemmen des Ringes mit einer kleinen Drehstrommaschine verbindet.

Theorie der Kathodenstrahlen. Über das Wesen der Kathodenstrahlen sind zwei Theorien aufgestellt worden, die man kurz als Äthertheorie und als Korpuskulartheorie bezeichnen kann. Die letztere, zuerst von Crookes und Puluy aufgestellte und von J. J. Thomson weiter entwickelte und begründete Theorie ist die jetzt herrschende. Nach derselben ist ein Bündel von Kathodenstrahlen nichts anderes als ein Schwarm von negativ geladenen, ausserordentlich kleinen Partikelchen [1]), die von der Kathode ausgehen und sich mit sehr grosser Geschwindigkeit geradlinig bewegen. Getrieben werden die Korpuskeln, die als negative Elektronen bezeichnet werden, durch die elektrostatischen Kräfte, besonders durch die

1) Der Nachweis, dass ein Strom negativer Elektrizität längs der Bahn der Kathodenstrahlen fliesst, gelang zuerst Perrin.

Abstossung der auf der Kathode angehäuften negativen Elektrizität. Mit Hülfe dieser Theorie lassen sich die Eigenschaften der Kathodenstrahlen leicht erklären.

Die mechanischen und thermischen Wirkungen sind als Folge des Bombardements anzusehen, dem Körper in der Röhre ausgesetzt sind — Abgabe von lebendiger Kraft seitens der aufprallenden Elektronen. Was die Ablenkung der Kathodenstrahlen durch einen Magnetpol anbelangt, so sei daran erinnert, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter im magnetischen Felde Kräfte ausgeübt werden. Eine Reihe von negativ geladenen, sich schnell vorwärts bewegenden Partikelchen ist aber nichts anderes als ein elektrischer Strom.

Jedes negative Elektron enthält zwei Bestandteile, nämlich eine Masse und eine elektrische Ladung. Die Masse hat ein bestimmtes Gewicht; denn jede Masse, mag sie gross oder klein sein, wird von der Erde angezogen. Das Gewicht der Elektronenmasse, in Gramm ausgedrückt, wollen wir mit m bezeichnen, wo natürlich m eine ausserordentlich kleine Zahl ist. Die Elektrizitätsmenge, die an die Masse gefesselt ist, werde e genannt.

Die Ablenkung, die die Kathodenstrahlen (die Elektronen) in einem magnetischen Felde von bestimmter Stärke erfahren, ist um so grösser, je grösser e ist. Aber da die Elektrizitätsmenge unzertrennlich mit der Masse m verbunden ist, und die Masse Trägheit besitzt, d. h. einer Änderung der angenommenen Bewegungsrichtung einen Widerstand entgegensetzt, so ist die Ablenkung des Elektrons in einem magnetischen Felde um so kleiner, je grösser m ist. Es lässt sich beweisen, dass für die Grösse der Ablenkung das Verhältnis $\frac{e}{m}$ maßgebend ist[1]. Es gelang nun J. J. Thomson und später anderen Forschern, $\frac{e}{m}$ zu bestimmen. Die gefundenen Werte stimmen der Grössenordnung nach überein. Es ergab sich das merkwürdige Resultat, dass $\frac{e}{m}$ für alle Kathodenstrahlen denselben Wert hat, was

1) Ausserdem hängt die Ablenkung von der Geschwindigkeit der Elektronen bezw. von der Potentialdifferenz der Elektroden ab.

auch der Gasinhalt war (Wasserstoff, Sauerstoff, atmosphärische Luft etc.), und aus welchem Metall auch die Kathode bestehen mag. Nach den besten Bestimmungen ist

$$\frac{e}{m} = 1{,}87 . 10^7.$$

Für das Wasserstoffion der Elektrolyte ist das Verhältnis der Ladung zur Masse ungefähr gleich 10^4. Da Wasserstoff das kleinste Äquivalentgewicht hat (nämlich Eins), so ist $\frac{e}{m}$ für das Wasserstoffion grösser als für irgend ein anderes Ion der Elektrolyte. Für die Partikelchen der Kathodenstrahlen hat $\frac{e}{m}$ einen 1000—2000 mal grösseren Wert.

Die Geschwindigkeit, mit der die negativen Elektronen durch die Röhre fliegen, wurde ebenfalls bestimmt. Es lässt sich voraussagen, dass diese Geschwindigkeit von der Potentialdifferenz der Elektroden (dem Potentialgefälle in der Röhre) abhängig ist; denn je grösser diese ist, d. h. je stärker die Elektroden geladen sind, um so grösser sind die die Elektronen treibenden Kräfte. Es ergaben sich (auf indirektem Wege) für die Geschwindigkeit Werte, die zwischen $^1/_{10}$—$^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit (300 000 km pro Sekunde) liegen. Von Wiechert und Des Coudres wurde v auf direktem Wege gemessen; sie fanden Werte, die zwischen 22 000—50 000 km (pro Sek.) liegen.

Es war für die Wissenschaft von der allergrössten Bedeutung, e und m einzeln zu kennen. Es ist das Verdienst des schon mehrfach genannten englischen Forschers Thomson, die Untersuchung durchgeführt zu haben. Es ergab sich, dass die Ladung eines Elektrons gerade so gross ist (abgesehen vom Vorzeichen) wie diejenige Elektrizitätsmenge, mit der ein Wasserstoffion geladen ist (in verdünnter Schwefelsäure z. B.). Da nun $\frac{e}{m}$ für das dieses Ion ca. 2000 mal grösser ist als für das negative Elektron, so muss die ponderable Masse des letzteren etwa 2000 mal kleiner sein als diejenige eines Wasserstoffatoms.

Nach der Atomtheorie ist das Wasserstoffatom die kleinste überhaupt existierende, also weder auf physikalischem, noch auf chemischem Wege teilbare Masse. Wenn aber die Existenz von Teilchen nachgewiesen ist, deren Masse bedeutend kleiner ist als diejenige des Wasserstoffatoms, so müssen die Atome der Chemie noch einer Zerlegung fähig sein. Nehmen wir noch die Tatsache hinzu, dass $\frac{e}{m}$ für verschiedene Gase denselben Wert hat, so liegt die Annahme nahe, dass die Korpuskeln der Kathodenstrahlen immer von derselben Art sind und dass die Atome der Chemie aus Elektronen zusammengesetzt sind. Diese Hypothese bedarf noch einer Stütze. Bis jetzt war nämlich immer nur von negativ geladenen Körperchen die Rede; es fragt sich nun, ob es auch Strahlen gibt, die aus positiv geladenen Partikelchen bestehen.

Kanalstrahlen. Goldstein, dem es gelang, die betreffende Strahlung nachzuweisen, benutzte eine Röhre, die durch eine senkrecht zur Achse stehende Scheidewand aus Metall in zwei Abteilungen zerlegt war. In der Metallwand befanden sich verschiedene Löcher; sie diente als Kathode. Es zeigte sich, dass durch die Löcher (Kanäle) Strahlenbündel hindurchgingen. Die Strahlen haben eine Reihe von Eigenschaften, die den Kathodenstrahlen nicht zukommen. Die Kanalstrahlen — so wurden die Strahlen von Goldstein genannt, weil sie aus den Kanälen der Kathode herauskommen — werden im (sehr starken) magnetischen Felde im entgegengesetzten Sinne abgelenkt[1]) wie die Kathodenstrahlen. Es ergab sich, dass $\frac{e}{m}$ von Gas zu Gas verschieden ist; für Wasserstoff, in dem die Strahlen besonders stark auftreten, hat das Verhältnis ungefähr den Wert, der den Wasserstoffionen zukommt (nämlich ca. 10^4).

Die in Fig. 158 (s. S. 282) abgebildete Kanalstrahlenröhre

1) Ein Kanalstrahlenbündel wird durch ein Magnetfeld nicht nur abgelenkt, sondern auch fächerartig auseinandergezogen; es sind in ihm auch gar nicht ablenkbare Strahlen enthalten.

gestattet, die positiven bezw. negativen Ladungen der Kanalstrahlen bezw. Kathodenstrahlen nachzuweisen. Den Aluminiumdraht E_3 macht man zur Anode, die Scheibe E_1 zur Kathode und verbindet die durchlochte Elektrode E_2 mit der Erde; die Scheibe S wird jetzt von Kathodenstrahlen getroffen und nimmt, wie man mit Hülfe eines mit ihr verbundenen Elektrometers nachweisen kann, eine negative Ladung auf. Verbindet man E_1 mit dem positiven und E_3 mit dem negativen Pole des Induktors, so wird S positiv geladen.

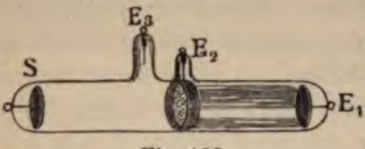


Fig. 158.

Es scheint demnach, dass sich die aus positiven und negativen Elektronen zusammengesetzten Atome im elektrischen Felde in der Weise dissoziieren, dass ein negatives Elektron frei wird und ein positiv geladener Rest zurückbleibt, dessen Masse nur wenig von derjenigen des Atoms verschieden ist. Die Stromleitung innerhalb der Röhre wird hauptsächlich von den leichter beweglichen negativen Elektronen besorgt.

Der Hypothese, dass die Kathodenstrahlen aus materiellen, elektrisch geladenen Teilchen bestehen, steht eine andere schroff gegenüber, nach der die Elektronen überhaupt keine Masse besitzen sollen, ihre Masse also nur eine scheinbare sei. Eine der wichtigsten Stützen der Korpuskulartheorie ist der Umstand, dass die nach den verschiedensten Methoden bestimmten Werte für $\frac{e}{m}$ der Kathodenstrahlen „ziemlich gut" übereinstimmen. Nun geht aus neueren Versuchen von Kaufmann hervor, dass $\frac{e}{m}$ von der Geschwindigkeit der Partikelchen abhängig ist, mit der sie sich bewegen, und zwar wird dieses Verhältnis um so kleiner, je mehr sich die Geschwindigkeit derjenigen des Lichtes nähert [1]).

1) Teilchen, die sich mit dieser Geschwindigkeit bewegen, werden von den radioaktiven Substanzen ausgesendet.

Dass sich e mit der Geschwindigkeit ändert, ist äusserst unwahrscheinlich; also ist der Schluss zu ziehen, dass m variabel ist. Man kann nun entweder annehmen, dass die ganze Masse nur eine scheinbare[1]) ist, d. h. dass das Elektron überhaupt keine Masse im Sinne der Mechanik besitzt, oder annehmen, dass in dem durch Messungen und Berechnungen gefundenen m zwei Summanden stecken, von denen der erste einer wirklichen Masse entspricht, der zweite aber einer scheinbaren. Die vorgetäuschte, scheinbare Masse besitzt das Teilchen, weil es elektrisch geladen ist. Man kann sich dies etwa folgendermaßen plausibel machen. Wenn man einem (wirklichen) Massenteilchen eine Beschleunigung erteilen will (s. S. 1), so muss man ihm Energie zuführen; diese ist in dem bewegten Teilchen aufgespeichert. Gilt dies nun auch für ein (massenloses) Elektrizitätsteilchen? Diese Frage ist zu bejahen. Ein sich bewegendes Elektrizitätsatom stellt nämlich einen elektrischen Strom dar; es erzeugt also ein magnetisches Feld um sich. Zur Erzeugung des Feldes wird aber Energie verbraucht, bezw. das Feld repräsentiert eine gewisse Energie. Die Energie eines elektrisch geladenen Massenteilchens, das sich bewegt, besteht demnach aus zwei Teilen, nämlich aus der seiner mechanischen Masse entsprechenden lebendigen Kraft und aus der Feldenergie. Wird bei der Bestimmung von m nur der erste Summand berücksichtigt, so erhält man für die wirkliche Masse einen zu grossen Wert m'; m' — m wäre dann die scheinbare Masse. Diese wird offenbar um so grösser, je schneller sich das Elektron bewegt. Die vorgetäuschte Masse wird als elektrodynamische Masse bezeichnet[2]).

---

1) Nach dem Grundgesetze der Mechanik ist Masse $= \frac{\text{Kraft}}{\text{Beschleunigung}} = m$. Nehmen wir nun an, dass ein Körper (eine Masse) in einen gewissen Bewegungszustand versetzt wird und dass ein Widerstand (Reibung, elektrostatische Kräfte) überwunden werden muss, dessen Existenz uns verborgen bleibt, so ist die Kraft grösser, als wenn kein Widerstand vorhanden wäre. Wird also die Masse mit Hülfe des Grundgesetzes bestimmt, so erhält man einen zu grossen Wert für dieselbe; dieser sei m'. Die Differenz m' — m würde dann als scheinbare Masse zu bezeichnen sein.

2) Es sei hier auch auf die Erscheinung der Selbstinduktion auf-

Abraham hat für die scheinbare Masse einen Ausdruck abgeleitet, aus dem hervorgeht, dass die mechanische Masse des Elektrons gegenüber der scheinbaren entweder sehr klein oder sogar wahrscheinlich Null ist. Wenn letzteres wirklich der Fall ist, so bestehen die Teilchen der Kathodenstrahlen nur aus Elementarquanten der Elektrizität, aus Elektrizitätsatomen. Es sei jedoch hervorgehoben, dass viele Physiker an der Anschauung festhalten, dass die Partikelchen aus einer wirklichen Masse und einer elektrischen Ladung bestehen. Das Wort Elektron wird also in zweifachem Sinne gebraucht.

4. **Das Zeemann-Phänomen.** Eine Erscheinung, nach der schon Faraday, allerdings vergeblich, gesucht hatte, wurde im Jahre 1896 von Zeemann entdeckt, nämlich die Verbreiterung der Natriumlinie in einem magnetischen Felde. Für Untersuchungen ist die Kadmiumlinie besser geeignet, diese soll daher als Beispiel dienen. Lässt man zwischen Kadmiumstäbchen Funken überspringen, so erhält man eine durch Kadmiumdämpfe gefärbte Flamme. Betrachtet man diese durch einen Spektralapparat, so sieht man ein aus einer blaugrünen Linie bestehendes Spektrum. Bringt man die Kadmiumflamme zwischen die Pole eines sehr kräftigen Elektromagnets, so nimmt man wahr, dass sich die Kadmiumlinie in drei Linien spaltet. Die mittlere Linie hat dieselbe Schwingungszahl wie das gewöhnliche Spektrum. Eine leichtverständliche Erklärung dieser Erscheinung, die man das Zeemann-Phänomen nennt, gab Lorentz[1]). Dieser nimmt an, dass „in jedem Körperteilchen mehrere mit Elektrizität geladene materielle Punkte sich befinden, von denen jedoch nur einer mit der Ladung e und der Masse m beweglich ist“ und Schwingungen ausführt. Wird die Schwingungszahl der Elektronen (infolge einer Temperaturerhöhung) eine sehr grosse, so werden in dem diese

---

merksam gemacht. Schon früher wurde darauf hingewiesen, dass sich das elektrische Fluidum so verhält, als ob es Trägheit besässe.

1) Siehe: Sichtbare und unsichtbare Bewegungen. Leichtverständliche Vorträge von H. A. Lorentz. Deutsch von G. Siebert.

umgebenden Weltäther Lichtwellen erzeugt. Wenn nun ein Elektrizitätsteilchen in irgend einer Richtung sich bewegt, so repräsentiert diese Bewegung einen elektrischen Strom. Auf einen solchen übt aber ein Magnet Kräfte aus (s. S. 94). Die Schwingungen der Elektronen müssen also, wenn die Kadmiumflamme in ein magnetisches Feld hineinkommt, modifiziert werden. Die Beeinflussung des Schwingungszustandes hat aber, wie hier nicht näher dargelegt werden soll, eine Veränderung des Spektrums zur Folge.

5. **Röntgenstrahlen.** Die im Jahre 1896 von Röntgen entdeckten und nach ihm benannten Strahlen entstehen aus Kathodenstrahlen von grosser Geschwindigkeit, wenn diese auf feste Körper fallen. Besonders günstig erfolgt die Umwandlung an der Oberfläche des Platins.

Wir wollen uns zunächst mit den Eigenschaften der Röntgenstrahlen beschäftigen. 1) Sie erregen wie die Kathodenstrahlen bei verschiedenen Substanzen Fluoreszenz, besonders bei Baryumplatincyanür. Man benutzt bei Röntgenuntersuchungen Schirme, die mit einer dünnen Schicht des genannten Salzes versehen sind (Leuchtschirme). 2) Sie wirken auf Gase, die sie durchdringen, ionisierend (s. S. 272). 3) Sie können viele Körper durchdringen, durch die das Licht nicht hindurchgehen kann, sie haben ein grosses Durchdringungsvermögen. Dicke Holzplatten, Bücher, Leder, Hartgummiplatten etc. lassen die Röntgenstrahlen durch, ohne dass eine stärkere Absorption erfolgt. Bezüglich der Metalle lehrt die Erfahrung, dass die Durchlässigkeit um so grösser ist, je kleiner das Atomgewicht ist. Aluminium von 3,5 mm Dicke ist ebenso durchlässig wie Platin von 0,018 mm. Da Fleisch im Vergleich zu den Knochen sehr durchlässig ist, so ist die Möglichkeit vorhanden, von Teilen des menschlichen Körpers Schattenbilder auf dem Leuchtschirme zu erzeugen.

Der zu durchleuchtende Körperteil muss sich ganz dicht vor dem Leuchtschirm befinden, damit die Knochen oder Fremdkörper möglichst scharf erscheinen. Kann das Zimmer, in dem die Durchleuchtung vorgenommen wird, nicht vollständig verdunkelt werden, so bedient man sich des sogenannten Kryptoskops

(s. Fig. 159). Es besteht aus einem stereoskopförmigen Körper, dessen Boden der Leuchtschirm bildet. Der Einguck ist mit Pelzverbrämung versehen, um einen vollständig lichtdichten Abschluss zu erzielen. Das Kryptoskop bietet auch ein bequemes Mittel, die Röhren auf ihre Qualität zu prüfen.



Fig. 159.

4) Eine sehr wertvolle Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist ihre Einwirkung auf die photographische Trockenplatte. Die Platte wird in lichtdichtes Papier eingewickelt oder in eine Kassette aus Holz oder Aluminium gelegt (Schichtseite nach oben); der Gegenstand, den man photographieren will, liegt auf der Platte und wird bei 25—50 cm Röhrenabstand belichtet. Die Expositionszeit hängt von verschiedenen Faktoren ab; sie richtet sich nach der Dicke des Gegenstandes, der Güte der Röhre, der Funkenlänge, der Unterbrechungszahl.

Man kann die Expositionszeit bedeutend abkürzen, wenn man einen sogenannten Verstärkungsschirm benutzt. Ein solcher besteht aus einem Kartonblatt, das so gross wie die Trockenplatte und auf einer Seite mit einer Substanz bestrichen ist, die unter dem Einflusse der Röntgenstrahlen fluoresziert (wolframsaures Calcium). Man legt den Schirm mit seiner Schichtseite auf die Schichtseite der Platte; Schirm und Platte werden in eine Kassette gelegt oder in lichtdichtes Papier eingeschlagen und den Röntgenstrahlen ausgesetzt. Das bläuliche Fluoreszenzlicht des Schirmes wirkt dann auf die Trockenplatte zugleich mit den Röntgenstrahlen selbst ein. Die Expositionszeit wird bei Benutzung eines Verstärkungsschirmes auf den dritten bis vierten Teil der sonst erforderlichen Zeit abgekürzt.

5) Die Strahlen werden von magnetischen und elektrischen Kräften nicht beeinflusst (sind also wesentlich verschieden von den Kathodenstrahlen). Auch hat man eine regelmässige Reflexion und Brechung nicht nachweisen können.

6) Lässt man intensive Röntgenstrahlen lange Zeit auf

eine Stelle des menschlichen Körpers fallen, so stellt sich eine nur langsam heilende Entzündung der Haut ein.

Röntgenröhren. Die Form, die man den Röntgenröhren jetzt meistens gibt, ist aus der Figur 160 zu ersehen. Die Kathode *K* aus Aluminium[1]) hat die Form eines Hohl-

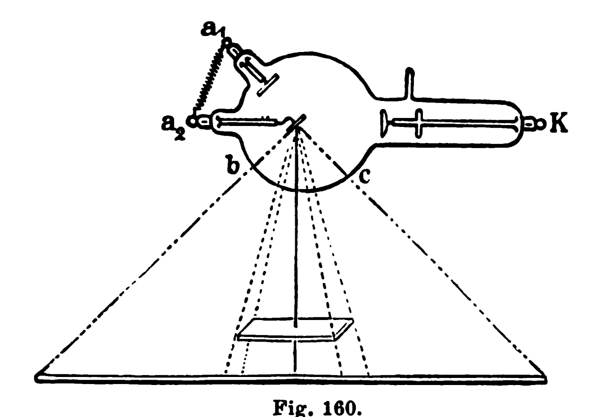


Fig. 160.

spiegels, die Anode a_1 besteht ebenfalls aus Aluminium. Die Umwandlung der Kathodenstrahlen in Röntgenstrahlen erfolgt an der sogenannten Antikathode a_2, einem im Brennpunkte des Hohlspiegels angeordneten Platinblech.

Die Strahlen gehen von einer fast punktförmigen Stelle der Antikathode aus (s. Fig. 160). Das Glas in der mittleren Kugelzone *bc* hat (bei den Röhren der Allgemeinen Elektrizitäts-Ges.) eine geringere Dicke als in den übrigen Teilen (Glas absorbiert die Strahlen). Die Röhre ist daher so anzuordnen, dass ihre Achse parallel der photographischen Platte liegt.

K und a_1 werden mit den sekundären Klemmen des Induktionsapparates verbunden. Man stellt dann bei ganz schwachem Strome die Stromrichtung fest. Der Strom muss die Röhre so durchfliessen, dass die Kugel deutlich zwei Hälften erkennen lässt: eine vor der Antikathode liegende, intensiv grüne und eine andere, nahezu dunkle. Es ist für die Röhre schädlich, wenn der Strom längere Zeit in falscher Richtung durch sie hindurchfliesst (a_2 ist

1) Das Material, aus dem die Kathode besteht, wird langsam zerstäubt. Verschiedene Metalle erleiden jedoch unter sonst gleichen Umständen verschieden grossen Gewichtsverlust. Dieser ist am grössten bei Platin, am kleinsten bei Aluminium.

dann Kathode, s. die Fussnote). Der Strom kann durch Ausschalten von Widerstand im Primärkreise so stark gesteigert werden, dass das Platinblech dunkelrot glüht.

Die Antikathode ist derjenige Teil der Röhre, der am meisten beansprucht wird. Besonders, wenn man einen Funkeninduktor mit Wehnelt-Unterbrecher benutzt, ist die Beanspruchung der Antikathode eine sehr grosse[1]). Man muss in diesem Falle besonders konstruierte Röhren anwenden. Sie sind so eingerichtet, dass die grosse an der Antikathode erzeugte Wärme schnell abgeführt wird.

Man macht entweder die das Platinblech tragende Metallmasse gross (s. Fig. 162), man vergrössert also die Wärmekapazität und

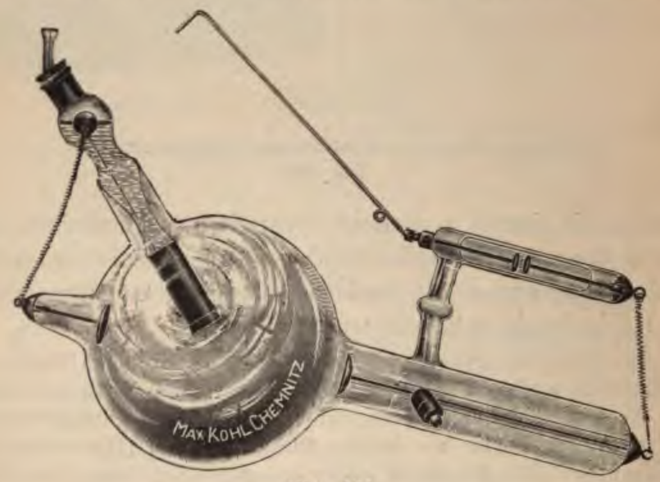


Fig. 161.

die Wärme ausstrahlende Oberfläche, oder man kühlt die Antikathode durch Wasser (s. Fig. 161) oder durch Öl.

Man unterscheidet zwischen harten, mittelweichen und weichen Röhren, je nach dem Durchdringungsvermögen der erzeugten Röntgenstrahlen. Dieses wächst mit der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen, durch deren Umwandlung die Röntgenstrahlen entstehen. Je grösser aber das Entladungs-

1) In diesem Falle ist die sekundäre Stromstärke relativ gross. Man vergleiche auch die Fussnote auf S. 138.

potential oder die Elektrodenspannung ist, um so schneller bewegen sich die Elektronen in der Röhre. Um die Spannung zu erhöhen, muss man die Röhre möglichst stark auspumpen.

Weiche Röhren haben eine geringere Verdünnung; die erzeugten Röntgenstrahlen werden stark absorbiert. Infolgedessen erscheinen die Knochen der Hand auf dem Fluoreszenzschirme tiefschwarz, die Fleischteile dunkel, die Hohlräume der Knochen sind nicht sichtbar. Die Röhren geben bei 5—40 Sekunden Expositionszeit gute Bilder der Hand, des Unterarmes und des Fusses.

Mittelweiche Röhren haben ein höheres Vakuum. Die Knochen der Hand erscheinen grauschwarz, die Fleischteile sehr hell; die Markhöhlen der Mittelhandknochen sind gut erkennbar. Sie sind für Brustkorbaufnahmen geeignet.

Harte Röhren haben ein noch höheres Vakuum, die Knochen der Hand erscheinen hellgrau, die Fleischteile der Finger ganz matt.

Der Grad der Verdünnung einer Röntgenröhre (daher auch der Härtegrad) ändert sich im Gebrauche; er kann grösser oder kleiner werden. Von den Elektroden wird nämlich Luft absorbiert, die bei der Evakuation nicht ganz frei wird, ferner bleiben an der Glaswand Luftbläschen haften. Diese Gase können während des Betriebes frei werden. Anderseits werden bei Stromdurchgang die Elektroden zerstäubt, und die entstandenen Metallteilchen absorbieren Gase. In der Regel werden die Röhren mit der Zeit härter[1]). Man hat daher Vorrichtungen ersonnen, das Vakuum zu regulieren, sogen. Regeneriervorrichtungen.

Eine solche besteht vielfach aus einem in die Glaswand eingesetzten Drahte aus Palladium. Dieses Metall hat die Eigenschaft, in glühen-



Fig. 162.

1) Die Röhren funktionieren bei zu grosser Luftverdünnung unregelmässig oder auch gar nicht mehr. Dieser Zustand tritt um so später ein, je grösser das Röhrenvolumen ist. Es empfiehlt sich daher die Anwendung grosser Röhren.

dem Zustande für Wasserstoff durchlässig zu sein. Erhitzt man nun mittels einer Spiritusflamme den Draht, so diffundiert aus dem Kern der Flamme Wasserstoff in die Röhre hinein (Osmose-Regulierung). Der Draht wird durch eine abnehmbare Glashülse vor Beschädigung geschützt (c in Fig. 162 S. 289).

Eine andere Regeneriervorrichtung besteht aus einem an der Röhre angebrachten Glasröhrchen, in dem sich ein chemisches Präparat befindet, das beim Erwärmen Luft abgibt.

Auch durch Erwärmen der Röhrenwand kann der Druck für kurze Zeit vergrössert werden.

Eine Röhre mit Reguliervorrichtung, die während des Betriebes (automatisch) funktioniert, ist in Figur 163 abgebildet. An die eigentliche Röntgenröhre ist eine Nebenröhre N angeschmolzen, in der sich eine Kathode k aus einem Stoffe befindet, der Gas abgibt, sobald der Strom dieser Kathode zugeführt wird. Das

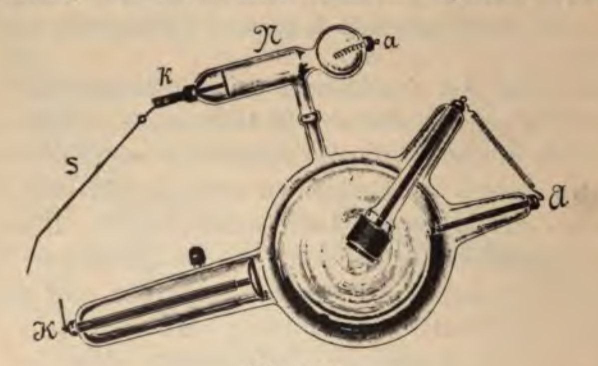


Fig. 163.

Hindurchleiten des Stromes durch N geschieht in der Weise, dass man die in einem Scharnier drehbare Messingstange S der Kathode der Hauptröhre K bis auf einen bestimmten Luftabstand nähert (bei Handaufnahmen bis auf etwa 2 cm, bei Beckenaufnahmen bis auf etwa 6 cm). Dass die Regulierung stattfindet, erkennt man daran, dass zwischen K und S Funken überspringen (der Nebenstrom geht von K durch das Verbindungsrohr nach A). Ausserdem besitzt die Röhre, die Universal-Röntgenröhre, eine Vorrichtung zum Härtermachen, die dann zur Anwendung kommt, wenn die Röhre infolge schlechter Behandlung zu weich geworden ist. Sie besteht aus einer spiralförmigen Elektrode a, deren Metall bei Stromdurchgang (als Anode) stark zerstäubt; infolgedessen wird Gas gebunden. Man verbindet den positiven Pol des Induktors mit a, den negativen mit K, wobei darauf zu achten ist, dass die Messingstange S nicht mit K in Berührung steht.

Ventilröhren haben den Zweck, die schädlich wirkenden Schliessungsströme (der sekundären Spule) zu unterdrücken. Besonders wenn der Induktor in Verbindung mit Wehnelt-Unterbrecher mit Wechselstrom gespeist wird, haben die Schliessungsströme eine beträchtliche Spannung. Die Röntgenröhre wird nun für den Öffnungsstrom richtig geschaltet, für den Schliessungsstrom wird also die Platinantikathode zur Kathode und zerstäubt. Die Ventilröhre beruht auf folgender von Puluj festgestellten Tatsache: wenn sich in einer stark evakuierten Röhre eine freie und eine von einer Ansatzröhre eingeschlossene Elektrode befinden (s. Fig. 164), so geht eine elektrische Entladung nur von der eingeschlossenen zur freien Elektrode hin.



Fig. 164.

Schaltet man also die Ventilröhre und die Röntgenröhre hintereinander, so kann nur Strom in einer Richtung fliessen. Die Ventilröhre wird hauptsächlich für den Betrieb weicher Röhren verwendet; sie bewirkt dann zugleich (wie eine vorgeschaltete Funkenstrecke) Erhöhung der Spannung.

Über das Wesen der Röntgenstrahlen bestehen verschiedene Hypothesen. Viele Forscher sehen die Röntgenstrahlen als Ätherwellen von sehr kleiner Wellenlänge (einige Milliontel Millimeter) an. Während jedoch gewöhnliches Licht (ebenso die ultraroten und ultravioletten Strahlen) aus einem ganzen Wellenzug besteht, haben wir in den Röntgenstrahlen kurze Impulse vor uns, die durch das Aufprallen der Elektronen auf die Antikathode entstehen [1]). Da ein sich

1) Der Unterschied würde also ein analoger sein wie zwischen den Schallwellen eines musikalischen Tones und den Erschütterungen der Luft bei einer Explosion.

bewegendes Elektron einen elektrischen Strom darstellt, so bedeutet das Auftreffen des Elektrons auf die Antikathode das plötzliche Verschwinden eines Stromes, und diesem muss ein im Raume sich ausbreitender elektromagnetischer Impuls entsprechen (s. elektrische Wellen).

Für Röntgenuntersuchungen sind am meisten zu empfehlen der Betrieb mit Motor-Quecksilber-Unterbrecher und derjenige mit Wehnelt-Unterbrecher. Bei beiden ist die Unterbrechungszahl eine ganz bedeutende, bei letzterem ausserdem die sekundäre Energie eine grosse. Gleichstrom ist bei Benutzung des elektrolytischen Unterbrechers vorzuziehen. Die Länge des aus der Porzellanröhre herausragenden Stiftes, von der die Stärke des primären Stromes und daher auch die sekundäre Spannung abhängig ist, muss dem Härtegrad der Röntgenröhre angepasst werden; für weiche Röhren wählt man etwa 6 mm, für harte etwa 10 mm. Wenn man den grosses Geräusch verursachenden Wehnelt-Unterbrecher nicht in dem Arbeitsraume aufstellen will, so kann man einen Apparat mit drei Platinstiften und einer gemeinsamen Bleiplatte benutzen. Werden die vier Elektroden durch Leitungen mit der im Laboratorium befindlichen Schalttafel verbunden, so kann man mittels eines Umschalters einen der drei verschieden langen Stifte einschalten, oder zwei bezw. alle drei gleichzeitig benutzen.

Um die Leistung des Induktors noch genauer dem Grade des Vakuums der Röntgenröhre anzupassen, bedient man sich der sogen. Walter-Schaltung (Schonung der Röhren). Die Drahtbewickelung der primären Spule besteht aus vier Abteilungen, deren Anfänge und Enden mit 8 Kontakthülsen (kleinen Metallröhren) verbunden sind, die auf dem Stirnende des Induktors stehen. Die vier Abteilungen kann man durch Einsetzen von Kontaktstiften in einfacher Weise in Reihe, oder parallel oder z. T. parallel z. T. hintereinander schalten (ähnlich wie bei vier Elementen, s. S. 67). Schaltet man alle Abteilungen in Reihe (weiche Röhre), so ist die Selbstinduktion am grössten, die Funkenlänge und die Unterbrechungszahl werden verringert. Benutzt man im Unterbrecher einen kurzen Platinstift, so erhöht sich die Frequenz wieder. Für harte Röhren schaltet man alle Abteilungen parallel (grosse Funkenlänge bezw. Elektrodenspannung, grosse Frequenz) etc.

6. **Becquerelstrahlen, radioaktive Substanzen.** Im Jahre 1896 fand Becquerel[1]), dass das Uran und seine Verbindungen unsichtbare Strahlen aussenden, die ähnliche Eigen-

1) Becquerel, Compte rendu 1896.

schaften haben wie die Röntgenstrahlen. Die Gesamtheit der Wirkungen der neuen Strahlen fasst man unter dem Namen Aktivität zusammen, und zwar spricht man von einer Radioaktivität, weil es sich um Strahlen handelt.

Becquerel war der Ansicht, dass die Aktivität einer Substanz um so grösser sei, je grösser ihr Urangehalt ist, oder dass die Radioaktivität eine dem Uranatom eigentümliche Erscheinung sei. Nun fand das Ehepaar Curie[1]), dass der Chalkolith, ein uranhaltiges Mineral, eine Aktivität besitzt, die grösser als diejenige des reinen Urans ist. Mithin muss im Chalkolith eine Substanz enthalten sein, die viel stärker aktiv ist als das Uran selbst. Durch ein überaus mühseliges und umständliches Verfahren gelang es, aus der Uranpechblende Salze herzustellen, die viele Tausend Mal stärker wirksam sind als das metallische Uran. Eingehende Untersuchungen des Ehepaars Curie und anderer Forscher ergaben, dass in der Uranpechblende drei Elemente enthalten sind, die Becquerelstrahlen aussenden.

Das wichtigste der neuen Elemente ist das Radium. Es wird aus seinen Lösungen gleichzeitig mit dem Baryum ausgefällt, es stimmt also in seinem chemischen Verhalten mit diesem überein, nur ist das Radiumchlorid in verdünntem Alkohol etwas weniger löslich als das Baryumchlorid. Diese Verschiedenheit in dem chemischen Verhalten wird für die Gewinnung des Radiums verwertet. Giesel stellte Radiumbromid aus der Joachimsthaler Pechblende dar. Aus 5000 kg Ausgangsmaterial gewann er nur etwa 2 g Radiumbromid. Es erklärt sich so der sehr hohe Preis der Radiumpräparate.

Dass das Radium ein neues Element ist, hat man aus spektralanalytischen Untersuchungen geschlossen (Démarçay); sein Spektrum weicht nämlich von dem der bekannten Elemente ab. Das Atomgewicht des Radiums wird zu 225 angegeben, während das des Baryums 137,5 ist.

Dem zweiten Elemente wurde Frau Curie zu Ehren, die eine Polin ist, der Name Polonium beigelegt. Dieses ist

---

1) Curie, Compte rendu 1898.

ein steter Begleiter und naher Verwandter des Wismuts. Man gewinnt es als Sulfat; dieses verflüchtigt sich leichter als das Wismutsulfat. Das Polonium verliert seine Aktivität im Laufe der Zeit, während eine Abnahme der Aktivität des Radiums bis jetzt nicht beobachtet wurde.

Von Debierne wurde aus der Pechblende ein drittes Element, das Aktinium, gewonnen, das in seinen Eigenschaften dem Titan gleichkommt. Ob wir in dem Polonium und Aktinium aber wirklich neue Elemente vor uns haben, die a priori radioaktiv sind, ist noch nicht sicher nachgewiesen. Es ist möglich, dass die Radioaktivität dieser Substanzen von sehr kleinen vorhandenen Radiumresten herrührt oder dass sie sekundären Ursprunges ist (s. induzierte Radioaktivität).

Marckwald[1]) gelang es, aus Wismut, das aus der Joachimsthaler Pechblende gewonnen war, eine Substanz abzuscheiden, die ihre Radioaktivität nicht verlor; er nannte sie Radiotellur, weil sie dem Tellur sehr nahe steht. Dieser Stoff, an dem die Pechblende noch viel ärmer ist als an Radium, soll die Wirksamkeit des letzteren ganz bedeutend übertreffen. Es gelang Marckwald, das Radiotellur auf elektrolytischem Wege auf Metallscheiben niederzuschlagen[2]).

Eigenschaften der Becquerelstrahlen. Die Strahlen des Poloniums werden sehr stark absorbiert, dünne Papierblätter können von ihnen nicht durchdrungen werden (α-Strahlen). Solche Strahlen von geringem Durchdringungsvermögen sendet auch das Radium — mit dem wir uns im folgenden ausschliesslich beschäftigen werden — aus, ausserdem aber Strahlen, die selbst durch millimeterdicke Bleiplatten hindurchgehen. Diese Strahlen, die man im Gegensatz zu den stark absorbierbaren α-Strahlen, als β-Strahlen bezeichnet, wirken wie die Röntgenstrahlen auf die photographische Trockenplatte. Eine andere chemische Wirkung der Radiumstrahlen besteht darin, dass sie Sauerstoff der Luft in Ozon verwandeln. Wenn

1) Über radioaktive Stoffe. Elektrot. Zeitschr. 1904 S. 327.

2) Eine orientierende Abhandlung über radioaktive Substanzen, in der die meisten Abhandlungen berücksichtigt werden, findet man in der Zeitschr. für angewandte Chemie 1900 S. 81.

man eine Flasche öffnet, in der sich Radium befindet, riecht man stets Ozon. Eine Wirkung, die wahrscheinlich auch zu den chemischen gehört, ist die, dass farblose Salze (NaCl, KCl etc.) unter Einwirkung der Becquerelstrahlen gefärbt werden, KCl z. B. dunkelrot. Setzt man das gefärbte Salz dem Lichte aus, so verschwindet die Farbe sehr schnell.

Nähert man ein Radiumpräparat einem geladenen Elektroskop, so wird dieses in kurzer Zeit entladen. Durch die Radiumstrahlen wird die Luft ionisiert, sie wird leitend (man vergl. S. 272). Ebenso beruht auf der ionisierenden Wirkung der Becquerelstrahlen die Erscheinung, dass die sogenannte Entladeverzögerung (s. S. 300) aufgehoben wird.

Man verbinde die (blanken) Kugeln eines Funkenmikrometers mit den sekundären Klemmen eines Induktionsapparates und richte es so ein, dass bei etwa 1 cm Abstand der beiden Kugeln eben keine Funken mehr überspringen. Nähert man jetzt das Radiumpräparat, so geht ein Funkenstrom über.

Radiumpräparate senden fortwährend ein ganz schwaches Licht aus. Diese Erscheinung nimmt nur ein vollkommen ausgeruhtes Auge im gut verdunkeltem Zimmer wahr; am besten beobachtet man abends. Am Tage ist ein vorheriger Aufenthalt im Dunkeln von mindestens 10 Minuten erforderlich.

Dieses Licht kann entweder Phosphoreszenzlicht (infolge eines chemischen Umsatzes) oder Fluoreszenzlicht sein, letzteres, indem die Substanz des Präparates durch ihre eigenen Strahlen zum Leuchten veranlasst wird.

Ferner können Becquerelstrahlen Fluoreszenz hervorrufen. Hierfür geeignete Substanzen sind Baryumplatincyanür, hexagonales Zinksulfit oder Sidotblende.

Nähert man im verdunkelten Raume einem Baryumplatincyanür- oder einem Verstärkungsschirme (s. S. 286) ein Radiumpräparat, so leuchtet eine grössere Stelle des Schirmes. Echte Diamanten leuchten prachtvoll, wenn sie von Becquerelstrahlen getroffen werden, während unechte nicht fluoreszieren.

Die bis jetzt aufgezählten Eigenschaften der Becquerelstrahlen kommen auch den Röntgenstrahlen zu. Eine Verschiedenheit aber ergibt sich, wenn man das Verhalten der Becquerelstrahlen in einem magnetischen Felde

untersucht. Röntgenstrahlen werden durch einen Magnet nicht beeinflusst. Wie Rutherford zuerst nachwies, werden die α-Strahlen so im magnetischen Felde abgelenkt, als ob sie aus einem Schwarme positiv geladener Partikelchen beständen, die β-Strahlen aber wie die Kathodenstrahlen, also im entgegengesetzten Sinne wie die α-Strahlen. Während für die Ablenkung der α-Strahlen sehr starke Felder erforderlich sind, werden die β-Strahlen leicht abgelenkt; erstere verhalten sich also wie die Kanalstrahlen, letztere wie die Kathodenstrahlen. Untersuchungen von Kaufmann ergaben, dass für die β-Strahlen die Geschwindigkeit und das Verhältnis $\frac{\text{Ladung}}{\text{Masse}}$ nicht konstant ist, dass also die ganze β-Strahlung aus langsameren und schnelleren Kathodenstrahlen zusammengesetzt ist.

Der kleinste Wert für v ergab sich zu $2{,}36 \,.\, 10^{10}$ cm (pro Sek.), der grösste zu $2{,}83 \,.\, 10^{10}$ cm (fast Lichtgeschwindigkeit); für die langsamen Strahlen ist $\frac{e}{m} = 1{,}31 \,.\, 10^{7}$, für die schnellsten ist $\frac{e}{m} = 0{,}63 \,.\, 10^{7}$. Über die hieraus sich ergebenden Schlüsse siehe Seite 283.

Vielfach wird noch die Existenz einer dritten Strahlung angenommen, die man als γ-Strahlen bezeichnet. Diese werden durch den Magnet gar nicht beeinflusst und haben ein sehr grosses Durchdringungsvermögen. Jedoch kann man die γ-Strahlen als Kathodenstrahlen grösster Geschwindigkeit ansehen, die eben wegen ihrer ausserordentlich grossen Geschwindigkeit mit den dem Experimentator zur Verfügung stehenden Mitteln keine nachweisbare Ablenkung erfahren.

Wie schon bemerkt, haben die verschiedenen Strahlen ein verschiedenes Durchdringungsvermögen. Eine Vorstellung von dem Unterschiede gewinnt man aus den folgenden Angaben: die α-Strahlen werden in ihrer Stärke auf die Hälfte reduziert, wenn sie durch ein Aluminiumhäutchen von 0,005 mm Dicke hindurchgehen, für die β-Strahlen ist die betr. Dicke 0,5 mm und für die γ-Strahlen 80 mm. Natürlich werden die Strahlen auch, wenn sie durch die Luft hindurchgehen, verschieden stark absorbiert. Je mehr eine Strahlung in der Luft absorbiert wird, um so stärker wirkt sie ionisierend. Wegen ihrer starken Absorption in der Luft wirken die α-Strahlen unter gewöhnlichen Umständen nicht auf die photographische Trockenplatte, im Vakuum sollen sie jedoch auf photo-

graphischem Wege nachweisbar sein. — Präparate, die in eine Kapsel eingeschlossen sind, liefern fast nur β- (bezw. β- und γ-) Strahlen.

Wenn die Strahlen des Radiums von einem festen Körper absorbiert werden, und es findet keine chemische Wirkung statt, so wird die ganze Energie der Strahlen in Wärme umgesetzt. Schliesst man Radium in eine Eisenkapsel ein, die so dick ist, dass keine Strahlen austreten, und bringt man die Kapsel in ein Eiskalorimeter, so kann man die entwickelte Wärme messen.

Man kann die Wärmeentwickelung durch folgenden Versuch demonstrieren: man verbindet ein stabförmiges (sog. offenes) Thermoelement mit den Klemmen eines Spiegelgalvanoskops und legt auf die eine Lötstelle das Radiumpräparat. Man beobachtet schon nach einigen Sekunden einen stärkeren Ausschlag. Der Strom hat eine solche Richtung, als ob man die Lötstelle, auf der das Präparat liegt, erwärmt hätte.

Endlich seien noch die physiologischen Wirkungen der radioaktiven Substanzen erwähnt. Wird die Haut einige Zeit den Radiumstrahlen ausgesetzt, so rötet sie sich nach einigen Tagen. Diese Beobachtung hatte schon Herr Curie gemacht. Mehrere Wochen nach der Bestrahlung traten sehr heftige Entzündungen auf. Ferner haben Aschkinass und Caspary nachgewiesen, dass die Becquerelstrahlen sehr stark auf Bakterien einwirken und sie töten. Diese Eigenschaften sucht man der Therapie nutzbar zu machen. Sichere Erfolge hat man bei Lupus erzielt; aber es bleibt abzuwarten, ob die günstige Wirkung auch eine dauernde ist. — Chlorophyll wird durch die Becquerelstrahlen zerstört, verschiedene Samen, z. B. Senfsamen, sollen ihre Keimkraft verlieren, wenn sie bestrahlt werden.

Die Radiumemanation, induzierte Radioaktivität. Das Radium sendet fortwährend einen sehr feinen Stoff aus, der selbst radioaktiv ist (Baryumplatincyanür zur Fluoreszenz erregt); diesen Stoff, der sich wie ein Gas verhält, nennt man die Emanation (weggeschleuderter Stoff). Körper, auf denen sich die Emanation niederschlägt, sind radioaktiv, sie sind „induziert radioaktiv". Um solche Körper zu erhalten, schliesst man das offene Radiumpräparat in ein Glas-

gefäss ein und bringt in dieses die Körper, auf denen sich die Emanation ansetzen soll. Die durch die Emanation induzierte Radioaktivität verschwindet nach einigen Stunden wieder. Leitet man die Emanation durch flüssige Luft, deren Temperatur bekanntlich eine ausserordentlich niedrige ist, so verliert sie ihre charakteristischen Eigenschaften, wahrscheinlich kondensiert sie sich.

Lord Ramsay[1]) sammelte geringe Mengen der Emanation in einem evakuierten Gläschen, in das Elektroden eingeschlossen waren. Bei Stromdurchgang leuchtete der Gasinhalt, und es konnte das Spektrum bestimmt werden. Dieses war ganz verschieden von dem der bekannten Gase in der atmosphärischen Luft (Argon, Helium). Merkwürdiger Weise verschwand dieses Spektrum nach einiger Zeit und machte dem des Heliums Platz.

Die Emanation hat die Eigenschaft, sich auf Körpern, die bis zu einer hohen Spannung negativ geladen sind, besonders stark zu verdichten. Man kann das, was sich auf dem negativ geladenen Körper ansammelt, mit einem Lederlappen abreiben, der dann radioaktiv wird[2]).

Wie besonders durch die Beobachtungen von Elster und Geitel nachgewiesen wurde, befindet sich die Emanation in geringer Menge überall in der atmosphärischen Luft; in den unteren Schichten ist sie stärker vertreten als in den oberen. Höchst wahrscheinlich ist die feste Erdrinde die Quelle der Emanation; von hier dringt sie mit der Bodenluft, besonders bei sinkendem Luftdruck, in die Atmosphäre ein. In dem Wasser der Quellen wird die Emanation gelöst; besonders die Thermalquellen sind reich an Emanation.

Die Versuche, die Eigenschaft des Radiums, fortwährend Energie abzugeben, mit dem Gesetze von der Erhaltung der Energie in Einklang zu bringen, haben bis jetzt zu keinem befriedigenden Resultate geführt. Möglich ist es, dass sich die Atome der radioaktiven Substanzen, die alle ein sehr hohes Gewicht haben, in einem labilen Zustande befinden, und dass

---

1) Siehe den Vortrag von Prof. Marckwald. Elektrot. Ztschr. 1904, S. 327.

2) Die induzierte Radioaktivität ist wahrscheinlich von der sekundären verschieden. Letztere besteht darin, dass feste und flüssige Körper, auf die Becquerelstrahlen fallen, ihrerseits Becquerelstrahlen aussenden.

sie unter Abgabe von Elektronen (Verringerung ihres Energieinhaltes) einem Gleichgewichtszustande zustreben, einem Gleichgewichtszustande, der bei den anderen Elementen schon längst eingetreten ist.

Über den elektrischen Funken siehe das folgende Kapitel, über den elektrischen Lichtbogen siehe Kapitel 19.

Siebzehntes Kapitel.

Elektrische Schwingungen und elektromagnetische Wellen, Funkentelegraphie.

---

1. Der elektrische Funke, Kondensatorentladung. Wenn man zwei sich gegenüberstehenden Kugeln oder sonstwie geformten Leitern (Elektroden) Elektrizität zuführt, und zwar der einen positive, der anderen negative, so haben die beiden Elektrizitäten das Bestreben, sich auszugleichen. Erreicht die Potentialdifferenz eine gewisse, von der Grösse der Kugeln und ihrem Abstande (sowie von der Beschaffenheit des Dielektrikums) abhängige Höhe, so erfolgt ein katastrophischer Ausgleich in Gestalt eines Funkens. Die Luft wird so stark erhitzt, dass sie glühend wird, und es werden winzige Metallteilchen von den Elektroden abgerissen, die ebenfalls glühen.

Für die Abhängigkeit der Funkenspannung E von dem Radius der Kugeln und dem Elektrodenabstand l dienen folgende Beispiele (nach Heydweiler):

$r = 0{,}5$ cm, $l = 0{,}5$ cm, $E = 17\,400$ Volt;
$r = 0{,}5$ „ $l = 1$ „ $E = 27\,000$ „ ;
$r = 1$ „ $l = 1$ „ $E = 31\,200$ „ .

Ferner hängt die Funkenspannung von dem Gasdrucke und von der Nähe fremder Körper ab.

Die Funkenentladung gehört zu den selbständigen Strömungen (s. S. 271). Zwischen den Elektroden (in dem elektrischen Felde) befindet sich eine geringe Anzahl von Ionen. Diese bewegen sich, getrieben durch die elektrostatischen Kräfte mit grosser Geschwindigkeit; durch Ionenstoss werden neue Ionen gebildet.

Entladeverzug. Wenn man zwischen den Elektroden die zur Entladung nötige Potentialdifferenz herstellt, so tritt in der Regel nicht sofort der Ausgleich ein, sondern erst nach einer gewissen Zeit, die man die Verzögerungsperiode nennt. Diese ist besonders gross in trockenen Gasen. Die Entladung erfolgt sofort, wenn man in die Nähe der Funkenstrecke eine Flamme bringt, indem diese ionisierend wirkt, ebenso wird durch ultraviolettes Licht die Verzögerung beseitigt (s. S. 272).

Oszillatorische Entladung. Ein Kondensator C (Fig. 165) mit den Belegungen P_1 und P_2 sei durch zwei Drähte mit einer kleinen Funkenstrecke ab verbunden[1]). Der Ausgleich der Potentialdifferenz erfolgt in analoger Weise wie der Niveauausgleich bei Flüssigkeiten. Dieser letztere besteht nicht in einer einmaligen Bewegung, sondern die Flüssigkeit führt Schwingungen aus.

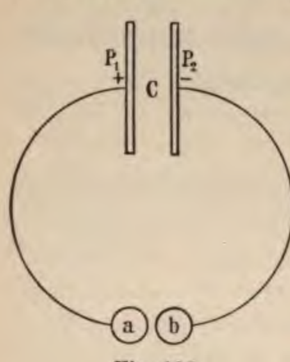


Fig. 165.

Man fülle eine U-förmige (nicht zu enge) Röhre etwa bis zur halben Höhe mit Quecksilber, den einen Schenkel verschliesse man durch einen Gummistopfen, durch den eine kleine Glasröhre hindurchgeht, und befestige an die Glasröhre einen Gummischlauch. Bläst man in den Gummischlauch hinein und drückt ihn dann zu (Quetschhahn), so wird eine Niveaudifferenz hergestellt. Öffnet man den Quetschhahn, so macht das Quecksilber eine grössere Anzahl

---

1) Der Widerstand der Funkenstrecke, der vor Beginn der Entladung ein sehr grosser ist, sinkt, wenn die Entladung beginnt, auf einen kleinen Betrag. Der Widerstand in den Drähten + Widerstand in der Funkenstrecke sei w. Der Selbstinduktionskoeffizient in den Drähten werde mit L und die Kapazität des Kondensators mit C bezeichnet. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf den experimentell leicht zu erreichenden Fall, dass w^2 im Vergleich zu $4\frac{L}{C}$ klein ist. Ist $w^2 > 4\frac{L}{C}$, so ist die Entladung keine oszillatorische, sondern eine kontinuierliche.

von Schwingungen. — Wird die Niveaudifferenz hergestellt, so wird in dem Quecksilber Energie aufgespeichert, wie bei einem Pendel, das man aus der Gleichgewichtslage entfernt. Die aufgespeicherte Energie wird durch eine einmalige Bewegung infolge der Reibung etc. nicht verbraucht, der Überschuss dient dazu, eine Niveaudifferenz im entgegengesetzten Sinne herzustellen etc.

Die Frage, warum die Entladung einer Leydener Flasche den angedeuteten Charakter hat, kann etwa folgendermaßen beantwortet werden. Wenn die Entladung beginnt, entsteht ein Strom, der in sehr kurzer Zeit bis zu einem gewissen maximalen Betrage steigt. Während dieser Zeit wird ein Teil der im Kondensator aufgespeicherten Energie in Joulesche Wärme (Drähte, Funkenstrecke) umgewandelt und ein Teil für die Erzeugung eines magnetischen Feldes (s. S. 90) verbraucht; gleichzeitig sinkt die Potentialdifferenz des Kondensators. Es wird ein Moment kommen, in dem die Stromstärke in den Drähten denjenigen Wert hat, der dem Ohmschen Gesetze entspricht ($\frac{e}{w}$, wenn e die noch vorhandene Potentialdifferenz und w der Widerstand in dem angegebenen Sinne ist, s. Fussnote S. 300). Dieser Strom kann nur während einer unendlich kurzen Zeit vorhanden sein, weil die Potentialdifferenz des für die Erzeugung von Joulescher Wärme Energie abgebenden Kondensators noch weiter sinkt. Nimmt der Strom ab, so wird dem Kondensatorkreise aus dem Felde Energie zugeführt; die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion sucht den alten Strom $\left(\frac{e}{w}\right)$ aufrecht zu erhalten, sie treibt ihrerseits positive Elektrizität von a nach b hin. Es fliesst also mehr Elektrizität von P_1 nach P_2 wie fliessen würde, wenn die Selbstinduktion nicht vorhanden wäre. Mithin wird der Kondensator im entgegengesetzten Sinne geladen, und es erfolgt eine zweite Entladung, für die die vorigen Betrachtungen gelten.

Die Elektrizität macht also in den Drähten und in der Funkenstrecke eine Reihe von Schwingungen, die Entladung ist eine oszillatorische oder oszillierende.

Im Jahre 1827 hatte Savary die sogenannte anomale Magnetisierung von Stahlnadeln beobachtet. Er liess den Ent-

ladungsstrom einer Leydener Flasche durch eine Spule gehen, in der sich eine Stahlnadel befand; diese erschien bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne magnetisiert. Henry kam (1842) zu der Überzeugung, dass „das Phänomen verlangt, eine Hauptentladung in einer Richtung und dann mehrere hin- und hergehende Reflexwirkungen anzunehmen, jede folgende schwächer als die vorhergehende“[1]. Helmholtz wies in seiner epochemachenden Schrift: „Über die Erhaltung der Kraft“ darauf hin, dass die Entladung einer Leydener Flasche nicht als eine einfache Bewegung der Elektrizität aufzufassen sei. Experimentell nachgewiesen wurde der oszillierende Charakter der Kondensatorentladung von Feddersen (1857—1862). Er beobachtete das Funkenbild in einem sehr schnell rotierenden Spiegel und fixierte es auf einer bewegten photographischen Trockenplatte; es ergab sich, dass die Erscheinung, die von dem Auge als ein Funke wahrgenommen wird, aus einer Reihe von ganz regelmässig aufeinanderfolgenden Partialfunken bestand. Aus der Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels und dem Abstande der dunklen Stellen in dem Lichtbande wurde die Dauer einer Schwingung berechnet. Es ergab sich, dass diese der Quadratwurzel aus der Kapazität C mal dem Selbstinduktionskoeffizienten L des Schwingungskreises (der Drähte) proportional ist.

Sehr schön lässt sich der oszillierende Charakter der Funkenentladung mit Hülfe der Braunschen Röhre nachweisen[2].



Fig. 166.

„Die Flaschen entladen sich durch ein Funkenmikrometer und eine Spule, welche, unter der Braunschen Röhre befindlich, die Ab-

1) O. Lodge, Modern Views of Electricity.

2) Richarz u. Ziegler, Annalen d. Physik 1, 468, 1900.

lenkung des Fluoreszenzfleckes hervorruft, dessen Bild im (schnell) rotierenden Spiegel betrachtet wird.“ Dieses besteht aus Wellen, deren Amplituden sehr schnell abnehmen.

Ebenso kann man mit Hülfe des Glimmlicht-Oszillographen demonstrieren, dass die Kondensatorentladung eine oszillatorische ist. Figur 166 zeigt eine von E. Ruhmer aufgenommene Photographie des Bildes, das man im rotierenden Spiegel beobachtet.

Stellt man eine Papierscheibe so auf, dass ihr Rand sich innerhalb der Funkenstrecke befindet, und setzt man die Scheibe durch ein Uhrwerk in sehr schnelle Rotation, so wird sie bei jeder Entladung einer grösseren Flasche mehrere Male durchbohrt. Wird die Scheibe berusst, so bildet sich um jedes Loch ein kleiner Kreis, aus dem der Russ grösstenteils durch die Partialfunken weggeblasen wurde (man schalte eine Spule ein).

Endlich sei noch auf einen Apparat von E. Leybolds Nachfolger in Cöln aufmerksam gemacht. Ein Blatt Papier befindet sich in einem Rahmen, der durch gespannte Federn sehr schnell in einer vertikalen Ebene abwärts bewegt wird. Das Papier befindet sich zwischen zwei Metallspitzen, die mit den Belegungen einer grossen Leydener Flasche verbunden werden. Die Einrichtung ist so getroffen, dass sich der Funke in dem Momente bildet, in dem der Rahmen seine Bewegung beginnt. Bei grosser Funkenlänge wird das Papier nur einmal durchbohrt, bei sehr kleiner erhält man eine ganze Reihe von Löchern.

2. Elektrische Schwingungen. Die Zeit, in der sich die Elektrizität in einem der beiden Drähte in Figur 165 einmal hin und her bewegt, nennt man die Schwingungsdauer. Diese ist eine ausserordentlich kleine, was schon aus dem Umstande hervorgeht, dass die Dauer eines Funkens eine sehr geringe ist. Nach Feddersen wächst die Dauer des ganzen Entladungsvorganges mit der Kapazität der Flaschen und mit der Schlagweite; die von ihm gefundenen Werte liegen innerhalb der Grenzen $\frac{1}{1000}$ bis $\frac{8}{100000}$ Sekunde[1]).

Aus der Theorie der Kondensatorentladung, die von William Thomson (1853) und G. Kirchhoff (1857) entwickelt wurde, ergibt sich, dass die Schwingungsdauer T (mit grosser Annäherung) gleich

$$T = 2\pi \sqrt{L.C},$$

1) Siehe Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik.

sie wächst also mit dem Selbstinduktionskoeffizienten L des Schwingungskreises und mit der Kapazität C.

Unter der Schwingungszahl n versteht man die Anzahl der Schwingungen, die man erhalten würde, wenn der Vorgang der oszillatorischen Entladung 1 Sekunde unverändert andauern würde. Offenbar ist

$$n = \frac{1}{T} \text{ oder } n . T = 1.$$

Durch Verkleinerung der Kapazität und der Selbstinduktion kann man Schwingungszahlen erhalten, die mehrere Hundert Millionen betragen (s. Hertzsche Versuche).

Wir wollen jetzt annehmen, dass der Kondensator *C* in Fig. 165 mit den Polen eines Induktionsapparates verbunden ist. Die Anzahl der Funken, die wir dann erhalten, ist gleich der Anzahl der Unterbrechungen. Diese, auf die Sekunde bezogen, sei gleich u. Auch bei dem grössten u, das wir erreichen können (Wehnelt-Unterbrecher), sind die den einzelnen Entladungen entsprechenden Schwingungen zeitlich durch relativ grosse Intervalle voneinander getrennt. Den Grund haben wir zu erblicken in der Dämpfung (s. S. 305). Während eines Entladungsvorganges mögen p Schwingungen der Elektrizität stattfinden; dann erhalten wir während 1 Sekunde u . p Schwingungen. Das Produkt u . p kann, wenn man einen schnell arbeitenden Unterbrecher benutzt, ganz bedeutende Werte annehmen. Wenn nun auch die während einer Schwingung sich bewegende Elektrizität klein ist, so kann doch die Stromstärke, d. h. die in 1 Sekunde durch einen Querschnitt des Drahtes fliessende Elektrizitätsmenge, ganz bedeutende Werte annehmen.

Im Vorstehenden ist eine Erklärung für den folgenden sehr belehrenden Versuch gegeben, der als ein indirekter Beweis für das Vorhandensein sehr schneller elektrischer Schwingungen bei der Kondensatorentladung angesehen werden kann. Ein grösserer Funkeninduktor wird mit Wehnelt-Unterbrecher betrieben. Die sekundären Klemmen sind mit einer Batterie aus Leydener Flaschen verbunden; in die Zuleitung zu den Flaschen wird ein Hitzdrahtinstrument für stärkere Ströme (10—15 Amp.) eingeschaltet. Arbeitet der Unterbrecher, so zeigt das Amperemeter zunächst keinen Strom an. Schaltet man aber eine (einige Millimeter lange)

Funkenstrecke (zwischen Zinkstäbchen) parallel zum Kondensator [1]), so kann man es leicht erreichen, dass der Zeiger des Strommessers bis zum Ende der Skala geht.

Die Dämpfung. Bei dem früher (s. S. 300) beschriebenen Analogieversuche findet man, dass die Schwingungsweite der Quecksilbersäule, die Amplitude, schnell abnimmt, die Schwingungen sind gedämpft. Als Ursache der Dämpfung haben wir die Energieabgabe seitens der sich bewegenden Masse anzusehen. Zunächst nämlich findet zwischen dem Quecksilber und der Glaswand Reibung statt, es wird also Wärme erzeugt; ferner wird ein Teil der Bewegungsenergie an die Luft abgegeben.

Die Dämpfung bei der oszillierenden Kondensatorentladung erkennt man sofort bei der Betrachtung der Fig. 166 (S. 302). Abgesehen von der Wärmeentwickelung in den Drähten und in der Funkenstrecke kommen als Ursachen der Dämpfung die Energieverluste in dem Dielektrikum des Kondensators und die Büschelbildung an seinen Metallbelegungen, die man im verdunkelten Zimmer fast immer wahrnimmt, in Betracht; ausserdem gehen von dem elektrisch schwingendem System Wellen des Äthers aus, die sich im Raume ausbreiten. Diese repräsentieren eine gewisse Energiemenge, die von dem Vorrate geliefert werden muss, der vor Beginn der Funkenentladung vorhanden war. Diese letztere Dämpfungsursache wird als Strahlung bezeichnet; sie kann ganz beträchtliche Werte annehmen.

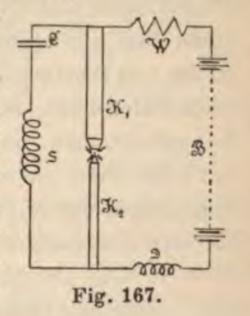


Fig. 167.

Ungedämpfte elektrische Schwingungen kann man, wie Duddell [2]) fand, mit Hülfe des Gleichstromlichtbogens erzeugen und zwar in einem Parallelkreise, in dem Selbstinduktion und Kapazität in Reihe geschaltet sind. Die Schaltung ist aus der Figur 167 zu ersehen. Der Lichtbogen zwischen den Kohlenstäben K_1 und K_2 wird durch eine Akku-

1) Die Zuleitungsdrähte zu der Funkenstrecke sind mit den sekundären Klemmen des Induktors zu verbinden.

2) The Electrician 1900, 14. u. 21. Dez.

mulatorenbatterie *B* gespeist; ihm ist eine Drosselspule *D* vorgeschaltet, um den elektrischen Schwingungen den Weg *D B W* zu versperren. Der Parallelkreis besteht aus einem Kondensator von einigen (mindestens 5) Mikrofarad Kapazität und einer Selbstinduktionsspule mit kleinem Ohmschen Widerstand. Bei Vernachlässigung des Widerstandes ist die Schwingungsdauer des Kondensatorkreises $T = 2\pi\sqrt{L.C}$. Macht man L und C gross, so gelangt man in den Bereich der musikalischen Töne (obere Grenze etwa 40 000 Schwingungen). Durch den Lichtbogen fliessen ausser dem Gleichstrome Wechselströme von sehr grosser Frequenz (die elektrischen Schwingungen), die gesamte durch den Lichtbogen fliessende Elektrizitätsmenge ändert sich also periodisch. Nun hängt das Volumen des Bogens (sein Querschnitt) von der Stromstärke ab; der Bogen dehnt sich also in schnellem Wechsel aus und zieht sich zusammen, er gerät in Vibrationen und tönt. Schaltet man in den Schwingungskreis ein Amperemeter ein, so zeigt dieses einen stärkeren Strom an als ein vom Akkumulatorenstrome durchflossenes Messinstrument. Günstig für den Versuch ist ein ganz kurzer Lichtbogen zwischen Homogenkohlen bei schwachem Strome. — Über den „sprechenden Lichtbogen“ siehe Telephonie.

3. **Die Resonanz.** Um die weniger leicht fassliche Erscheinung der elektrischen Resonanz dem Verständnisse näher zu rücken, wollen wir von den Schwingungen der Materie ausgehen. Wenn man einen gespannten Stahldraht in lebhafte Schwingungen versetzen will, muss man ihm eine gewisse Energiemenge zuführen. Diese werde bei der anfänglichen Amplitude a mit Q bezeichnet. Statt die Energie Q auf einmal auf die Saite zu übertragen, kann man ihr öfter, sagen wir n-mal, einen Teil von Q mitteilen, etwa in der Weise, dass man eine Reihe von Wassertropfen in richtig gewählten Intervallen auf die Saite fallen lässt. Jeder Tropfen erteilt dem Drahte einen Impuls. Bezeichnet man die Schwingungsdauer des Drahtes mit T und mit τ die Zeit, die zwischen dem Aufprallen eines Tropfens und demjenigen des folgenden liegt, so ist die günstigste Bedingung für das Zustandekommen einer grösseren Amplitude die, dass $T = \tau$. Die allmähliche Vergrösserung der Amplitude infolge des günstigen Zusammenwirkens einer Anzahl aufeinanderfolgender Bewegungsantriebe wird als Resonanz bezeichnet. Wie leicht einzusehen, ist starke Dämpfung des schwingenden Drahtes ungünstig für die Resonanz.

Wir wenden uns jetzt zu der durch Schwingungen verursachten Resonanz. Zwei Stimmgabeln (auf Resonanzkästen)[1]) mögen genau gleiche Schwingungszahlen haben. Die erste, die kurz als Sender bezeichnet werde, soll durch Anschlagen mit einem Holzhämmerchen in den Schwingungszustand versetzt werden. Es entstehen dann in der Luft abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen, die sich im Raume ausbreiten (Schallwellen). Die erste Verdichtung, von der die zweite Stimmgabel, der Empfänger, getroffen wird, übt auf diesen einen schwachen Stoss aus. Bezeichnen wir einen materiellen Punkt an dem einen Schenkel des Empfängers mit a; dieser führt Schwingungen von zunächst kleiner Amplitude aus. In dem Momente, in dem a seine erste Schwingung gemacht hat, kommt eine zweite Verdichtung an, durch die a ein neuer Impuls erteilt wird; die Amplitude wird grösser. Erreicht die Amplitude des Punktes a eine gewisse Grösse, so wird durch die zweite Stimmgabel ein wahrnehmbarer Ton erzeugt.

Das Mitschwingen (Resonanz) kommt hier in ähnlicher Weise zustande wie bei der ersten Analogie; den fallenden Tropfen entsprechen die Verdichtungen der Luft. — Es sei hier darauf aufmerksam gemacht, dass die Analogie zwischen den Erscheinungen der elektrischen Schwingungen und denjenigen der Akustik eine sehr weitgehende ist.

Wenn man den Empfänger durch Wachs, Stearin, Siegellack oder dgl. beschwert, so ändert sich seine Schwingungszahl, und das Mitschwingen wird schwächer bezw. hört ganz auf. Die Schwingungen des Punktes a werden nämlich bald befördert, bald gehemmt.

Ist die Schwingungszahl des Empfängers doppelt so gross wie diejenige des Senders, so *kann* kräftiges Mitschwingen erfolgen, wenn die Masse des Empfängers klein und die Dämpfung gering ist.

Elektrische Resonanz, resonierende Leydener Flaschen nach Lodge. Wenn in einem Leiter elektrische Schwingungen erzeugt werden, so werden in dem den Leiter umgebenden Äther Wellen erzeugt, die sich im Raume mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten (s. Hertzsche Versuche). Treffen

---

1) Von der eingeschlossenen Luftsäule gilt Analoges wie von der im folgenden als Empfänger bezeichneten zweiten Stimmgabel. — Die offenen Seiten der Resonanzkästen werden einander zugewendet.

diese Wellen[1]) ein anderes schwingungsfähiges System, so werden in diesem elektrische Schwingungen hervorgerufen (wie in der sekundären Spule eines Induktionsapparates, auch wenn zwischen den primären und sekundären Windungen ein grösserer Zwischenraum liegt, Wechselströme erzeugt werden, wenn durch die primäre Spule solche Ströme fliessen). Dem zweiten Schwingungskreise[2]) kommt ebenfalls eine gewisse Schwingungsdauer T' zu, die, wenn seine Kapazität mit C' und seine Selbstinduktion mit L' bezeichnet wird, durch $T' = 2\pi\sqrt{L'C'}$ gegeben ist. Würde nur eine Welle ankommen, so würde diese in dem zweiten Kreise Elektrizität in Bewegung setzen, positive nach der einen, negative nach der anderen Richtung treiben, und die Elektrizität würde einige Schwingungen mit der Schwingungsdauer T' ausführen. In Wirklichkeit kommt eine zweite Welle (ein zweiter Antrieb für das elektrische Fluidum) an. Ist nun T = T', so wirkt die zweite Welle in demselben Sinne wie die erste, die Schwingungen in dem Empfänger werden lebhafter etc.

Die Erscheinung der elektrischen Resonanz kann man in einfacher Weise mit Hülfe der in Fig. 168 abgebildeten Leydener

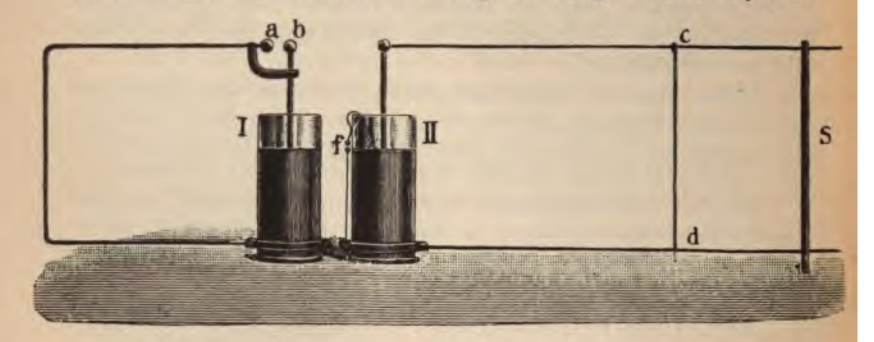


Fig. 168.

1) Sie entsprechen den Schallwellen bei dem eben beschriebenen akustischen Versuch.

2) Ein Kondensator verhält sich Wechselstrom gegenüber — die elektrischen Schwingungen sind Wechselströme sehr grosser Frequenz — wie ein Widerstand. Wird die Luftstrecke in Figur 165 (S. 300) durch einen Funken überbrückt, so kann man die Anordnung als einen geschlossenen Kreis ansehen.

Flaschen demonstrieren. Die beiden Belegungen der Flasche *I* (Sender) sind durch einen Schliessungsdraht mit Funkenstrecke miteinander verbunden; die Flasche wird durch einen Induktionsapparat gespeist. Jedesmal, wenn ein Funke zwischen *a* und *b* überspringt, wogt die Elektrizität in dem Schliessungsdrahte oft hin und her. Die zweite Flasche hat dieselbe Kapazität wie die erste; ihre beiden Belegungen sind mit zwei kleinen in geringem Abstande sich gegenüberstehenden Kugeln *f* verbunden; *cd* ist ein Gleitkontakt, *S* eine isolierende Stütze. Dadurch, dass man *cd* verschiebt, kann man die Selbstinduktion des Empfängers verändern. Die Flaschen werden so mit 30—50 cm Abstand aufgestellt, dass die Ebenen der beiden Drahtrechtecke parallel laufen (nicht, wie in der Figur, zusammenfallen).

1) Man richte es so ein, dass $L = L'$, d. h. dass die beiden Drahtrechtecke — das zweite wird durch *cd* begrenzt — gleich gross sind (vollkommene Resonanz). Bei jedem Funkenübergang zwischen *a* und *b* entlädt sich die zweite Flasche.

2) Verschiebt man *cd*, macht man also $L' \lesseqgtr L$, so beobachtet man bei *f* keine Fünkchen; macht man den Abstand der beiden Flaschen klein, so erfolgen wieder sekundäre Entladungen. Man kann also mit Wellen einer bestimmten Periode in Kreisen von verschiedener Schwingungsperiode Eigenschwingungen hervorrufen, eine Erscheinung die man als multiple Resonanz bezeichnet. Man kann annehmen, dass nur die erste kräftige Welle (Dämpfung) den Empfänger anregt.

3) Schaltet man parallel zur Flasche *I* eine andere kleine Leydener Flasche, und macht man $L = L'$, so bilden sich bei *f* keine Fünkchen.

4) Schiebt man zwischen die beiden abgestimmten Flaschen ($T = T'$) einen Holzschirm, eine grosse Glas- oder Hartgummiplatte, so werden die Wellen nicht gestört, wohl aber durch einen Metallschirm.

5) Ein weiterer Versuch mit den resonierenden Flaschen wird auf S. 338 beschrieben.

4. Stehende Schwingungen in Drähten und Spulen. Ein Kondensator *C* (Fig. 169) möge sich oszillatorisch entladen. Die Platte P_1 des Kondensators wird dann abwechselnd positiv und negativ geladen, und zwar erfolgen die Poten-

tialänderungen gerade so, als ob P_1 mit einer Klemme einer Wechselstrommaschine mit ausserordentlich hoher Periodenzahl

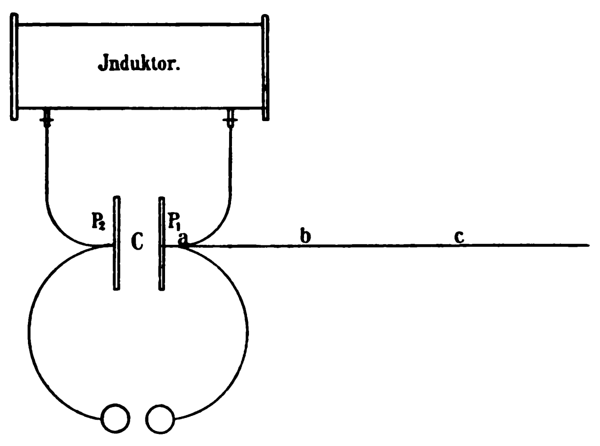


Fig. 169.

verbunden wäre. An P_1 werde nun ein Draht befestigt, von dem wir zunächst annehmen wollen, dass er unendlich lang sei. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Potentialschwankungen in dem Drahte fortpflanzen, werde mit v, die Schwingungsdauer mit T bezeichnet. Wir beginnen unsere Betrachtungen mit dem Momente, in dem P_1 unelektrisch ist und anfängt ein positives Potential anzunehmen (Zeit Null).

Zur Zeit $\frac{T}{4}$ ist die positive Elektrizität bis zu einem Punkte b gekommen, der bestimmt ist durch die Gleichung $ab = v \cdot \frac{T}{4}$. Dieser Punkt hat einstweilen das Potential Null, im Anschlusspunkte a ist die Spannung im positiven Maximum. Errichtet man in jedem Punkte der Strecke ab ein Lot, dessen Grösse der Spannung proportional ist, so bilden die Endpunkte aller Lote eine viertel Welle. Zur Zeit $\frac{T}{2}$ ist die Spannung in a Null, im Punkte b hat sie einen positiven Höchstwert; denn während der Zeit $\frac{T}{4}$ bis $\frac{T}{2}$ wandert gleichsam die vorige

Viertelwelle um das Stück $v \cdot \frac{T}{4} = bc = ab$ fort. Der Potentialverteilung entspricht jetzt eine halbe Welle. Nach abermals $\frac{1}{4}$ Periode ist das Potential der Strecke *ab* ein negatives. Zu einer beliebigen Zeit t gibt es also auf dem Drahte Stellen positiven und negativen Maximums für die Spannung. Die zeitlichen Potentialänderungen längs des Drahtes werden also durch fortschreitende Wellen versinnlicht[1]) (in Wirklichkeit haben wir es aber mit fortschreitenden Schwingungen zu tun).

Eine akustische Analogie wäre folgende: an einem Ende einer sehr langen Röhre werden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft (etwa durch eine Stimmgabel) erzeugt. Man erhält dann in der Röhre fortschreitende Schall w e l l e n (genauer Schwingungen).

Bei einem Drahte von endlicher Länge sind die Verhältnisse komplizierter. Das freie Ende nämlich wird abwechselnd positiv und negativ geladen. Es ist also so, als ob dieses Ende mit einer zweiten Funkenstrecke verbunden wäre oder mit einem Pole einer Wechselstrommaschine, die Ströme von ausserordentlich grosser Frequenz liefert. Das freie Ende sendet nun Wellen in den Draht, die im entgegengesetzten Sinne laufen wie die eben betrachteten, anders ausgedrückt, die Wellen (Schwingungen) werden an dem freien Ende zurückgeworfen, reflektiert. Die direkten und die reflektierten Wellen durchkreuzen sich, sie interferieren, und es bildet sich ein System von s t e h e n d e n W e l l e n (wie in einer gedeckten Pfeife stehende Schallwellen entstehen).

Das Verständnis wird wesentlich gefördert, wenn man sich zunächst über stehende Schallwellen Klarheit verschafft. Diese kann man schön und leicht mit Hülfe eines Apparates der Firma E. L e y b o l d s Nachfolger in C ö l n demonstrieren. Eine etwa 1 m lange weisse Schnur ist mit dem einen Ende an einer Schraube, mit dem anderen Ende an dem Anker eines Wagner-Neefschen Hammers befestigt. Verbindet man die Elektromagnetspule mit einer Stromquelle von 8 Volt, so schwinkt der Anker, und es bilden sich

1) In diesem Sinne wird im folgenden oft von elektrischen Wellen auf Drähten gesprochen. Wir werden später sehen, dass sich die Wellen im Dielektrikum fortpflanzen.

stehende Wellen. Dadurch dass man die Spannung des Fadens ändert, kann man die Anzahl der Schwingungsknoten variieren.

Auf unserem Drahte entstehen Spannungsknoten und Spannungsbäuche. Wenn ein Punkt M des Drahtes ein Spannungsknoten ist, so ist dort das Potential, solange die stehenden Schwingungen dauern, Null. Schneidet man von M aus nach rechts oder nach links eine viertel Wellenlänge ab, so gelangt man zu je einem Spannungsbauche: N bezw. N' mögen die betreffenden Punkte heissen. Zur Zeit t sei die Spannung in N Null; dann hat sie dort $\frac{T}{4}$ Sekunden später ein positives oder negatives Maximum; angenommen, sie habe ein positives Maximum ($+ E$), dann hat die Spannung in N' zur selben Zeit ein negatives Maximum ($- E$). Eine halbe Periode später haben N und N' die Rollen gewechselt. Die Potentialschwankung ist also für N bezw. N' durch $2E$ gegeben. In einem Punkte X zwischen M und N ist zur Zeit t das Potential ebenfalls Null; zur Zeit $t + \frac{T}{4}$ hat die Spannung in X einen gewissen Höchstwert erreicht, dieser ist aber kleiner als E, er sei e. Die Spannungsänderung ist also durch $2e$ definiert.

Charakteristisch ist für die stehenden Wellen, dass zu einer bestimmten Zeit t, ebenso zur Zeit $t + \frac{T}{2}$, $t + T$ etc. die Spannung überall Null ist, dass ferner das positive Maximum der Spannung für alle Punkte einer halben Welle in demselben Momente ($t + \frac{T}{4}$, $t + 5\,\frac{T}{4}$ etc.) vorhanden und dass dieses für die verschiedenen Punkte verschieden gross ist.

Der Abstand zwischen einem Knoten und dem benachbarten Bauche ist offenbar $\frac{\lambda}{4}$, wenn λ die Wellenlänge der stehenden Wellen ist. Diese ist aber gleich der Wellenlänge der fortschreitenden Wellen. Man kann nun mittels einer (elektrodenlosen) evakuierten Röhre (Geisslerschen Röhre) die Knoten und Bäuche bestimmen; in den Bäuchen leuchtet die Röhre am stärksten, in den Knoten

(falls man reine Knoten, nicht relative erhält) gar nicht. Man kann also so λ messen. Ist $n = \frac{1}{T}$ die Schwingungszahl und v die Geschwindigkeit, mit der sich die Potentialschwankungen auf dem Drahte ausbreiten, so ist $v = n \cdot \lambda$. Die Schwingungsdauer kann man, falls sie nicht gar zu klein ist, mittels eines sehr schnell rotierenden Spiegels bestimmen und dann v berechnen. Versuche von Towbridge und Duane, die nach diesem Prinzip ausgeführt wurden, ergaben für v den Wert $3 \cdot 10^{10}$ cm (per Sek.). Dies ist aber die Lichtgeschwindigkeit.

Demonstration stehender Wellen auf Drähten s. S. 332.

5. **Tesla-Versuche.** Tesla hat mit Wechselströmen hoher Frequenz und hoher Spannung eine grosse Reihe von schönen und interessanten Versuchen ausgeführt, die seinerzeit grosses Aufsehen erregten. Er benutzte eine elektrische Maschine, die Wechselströme bis zu 30000 Perioden lieferte, und den Thomsonschen Schwingungskreis (Kondensatorentladungen).

1) Der Impedanzversuch, Skineffekt[1]). Bei Wechselströmen, deren Frequenz eine sehr hohe ist, spielt die Selbstinduktion, auch wenn es sich um verhältnismässig kurze Drähte handelt, eine sehr wichtige Rolle. Dadurch, dass man den Draht zu einem Bügel oder einer Schleife formt, wird die Selbstinduktion noch erhöht. Wie wir nun gesehen haben, unterscheidet man zwischen dem wirklichen (Ohmschen) und dem scheinbaren Widerstand (Impedanz). Letzterer ist um so grösser, je schneller die Änderungen der Stromstärke erfolgen, je grösser also die Periodenzahl des Stromes ist. Handelt es sich um schnelle elektrische Schwingungen, d. h. um Wechselströme sehr grosser Frequenz, so kann die Impedanz in einer Drahtschleife ganz bedeutende Werte annehmen.

Noch ein zweiter Umstand kommt bei der Erklärung des Impedanzversuches in Betracht. Einen Draht können wir uns aus sehr vielen, dünnen Fäden zusammengesetzt denken. Jeder einzelne Faden wirkt bei Stromänderungen auf alle übrigen Fäden induzierend ein. Jedoch ist die Selbstinduktion in den

---

1) Skin = Haut.

einzelnen Fäden nicht die gleiche, denn die an der Peripherie des Drahtquerschnittes liegenden Fäden haben eine geringere Anzahl von Nachbarn, die auf sie induzierend wirken, als die in der Mitte liegenden. Da nun die Selbstinduktion einer Vergrösserung des Widerstandes gleichkommt, und der Strom von mehreren ihm zur Verfügung stehenden Wegen den bequemsten wählt, so bevorzugen Wechselströme die äusseren Drahtschichten [1]). Je grösser die Frequenz ist, um so grösser wird die Stromdichte in den an der Oberfläche liegenden Fäden im Vergleich zu derjenigen in der Mitte des Drahtes. Man nennt die kurz charakterisierte Erscheinung den Oberflächen-, Haut- oder Skineffekt. Dieser hat eine Verkleinerung des wirksamen Leiterquerschnittes oder eine Vergrösserung des Ohmschen Widerstandes zur Folge [2]).

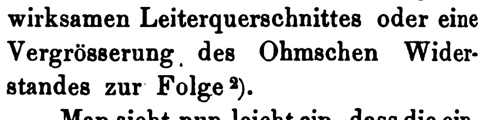


Fig. 170.

Man sieht nun leicht ein, dass die einfachen Gesetze über Stromverzweigungen keine Gültigkeit mehr haben, wenn es sich um elektrische Schwingungen oder um Ströme von grosser Frequenz handelt.

Die Anordnung bei dem Impedanzversuche ist folgende: man verbindet [3]) die sekundären Klemmen eines Induktionsapparates J (s. Figur 170) mit den Belegungen eines grösseren Kondensators C, die äussere Belegung mit der einen Elektrode a eines Funkenmikrometers (Zinkstäbchen), die innere Belegung mit dem Drahtbügel deh aus dickem Drahte und diesen endlich mit der zweiten

1) Fliesst durch einen Draht Gleichstrom von J Amp., und denken wir uns einen Drahtquerschnitt in n gleiche Teile (Elementarquerschnitte) zerlegt, so kommt auf jeden der Stromanteil $\frac{J}{n}$. Dies gilt also nicht für Wechselströme.

2) Näheres siehe Handbuch der Elektrotechnik I, 2, S. 121.

3) Um die Dämpfung zu verringern, wähle man für die nötigen Verbindungen dickere Kupferdrähte.

Elektrode *b* des Funkenmikrometers. (Es empfiehlt sich, diese Elektrode auch mit der Erde zu verbinden.) Der Bügel wird unten durch eine Glühlampe *g* überbrückt. Diese leuchtet wider Erwarten. (Funkenlänge 4—5 mm.)

2) Induktionswirkung der Ströme hoher Frequenz. Den Drahtbügel des vorigen Versuches ersetzt man durch eine Spirale aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes (s. Fig. 171), lässt also durch diese die schnellen elektrischen Schwingungen der Kondensatorentladung gehen. Man schiebt die Glasglocke, auf der sich zwei Drahtwindungen befinden, die durch eine Glühlampe miteinander verbunden sind, über die Primärspule und findet, dass die Lampe leuchtet. Je mehr die sekundären Windungen der Mitte der Primärspule genähert werden, um so heller leuchtet die Lampe.

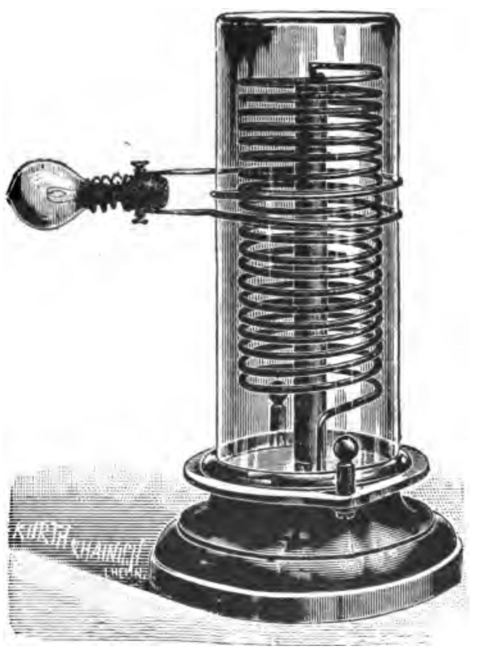


Fig. 171.

3) Um Ströme hoher Frequenz und hoher Spannung zu erzeugen, schickt man die elektrischen Schwingungen der Kondensatorentladung durch die Primärspule eines eisenfreien Transformators. Viel benutzt wird der in Fig. 172 (s. S. 316) abgebildete Transformator von Elster und Geitel. Die primäre Spule besteht aus wenigen Windungen (6—8) eines dicken, durch Kautschuk isolierten Drahtes (man vgl. die Fussnote 3 auf S. 314). Die sekundäre Spule aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes befindet sich innerhalb eines grossen Glasrohres, das mit Öl (ausgekochtes Rüböl)

angefüllt ist, damit zwischen den einzelnen Windungen keine Funken überspringen.

Sehr hohe Spannungen zwischen den sekundären Klemmen des Transformators erzielt man nur dann, wenn der primäre

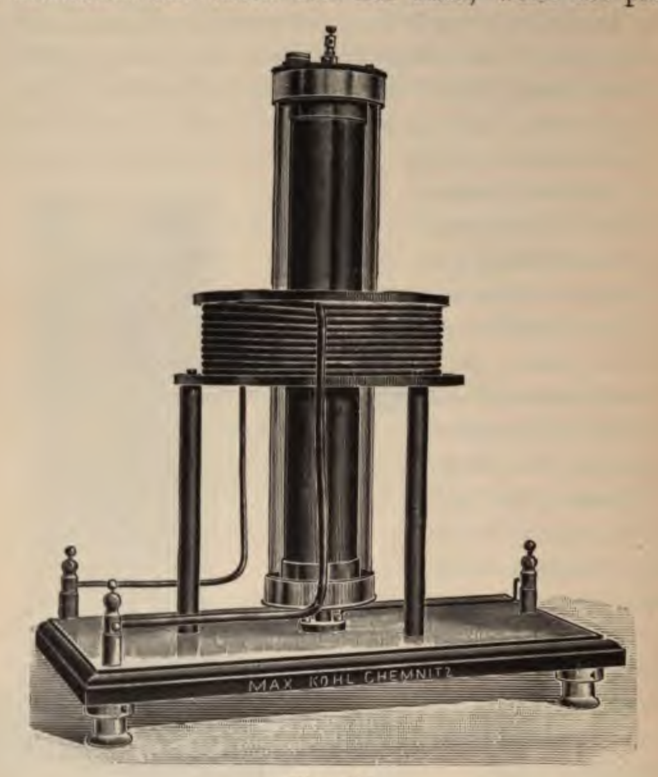


Fig. 172.

und sekundäre Kreis in Resonanz sind, d. h. wenn man Flaschen von einer bestimmten Kapazität benutzt, bezw. wenn man eine veränderliche Selbstinduktion in den Schwingungskreis einschaltet[1]). Ist richtig abgestimmt, so senden die sekundären Klemmen des Transformators 5—10 cm lange Lichtbüschel aus. Die Schaltung ist dieselbe wie bei dem vorigen Versuche; die

1) Es ist günstiger, wenn man durch Veränderung der Kapazität die Abstimmung zu erreichen sucht.

dort benutzte Kupferspirale wird also durch die primäre Spule des Transformators ersetzt. Am besten verwendet man einen Flüssigkeits- oder einen Quecksilberstrahl-Unterbrecher.

Um die Neigung zur Lichtbogenbildung (Erniedrigung des Entladepotentials) zu verhindern, kann man den Entladefunken anblasen [1]), oder man lässt ihn in dem Zwischenraume zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagnets überspringen, dessen Polschuhe mit einer Kappe aus einer isolierenden Masse bedeckt sind. Als Elektroden benutzt man Zinkstäbchen.

Von den zahlreichen Versuchen [2]), die man mit den Strömen hoher Frequenz und Spannung ausführen kann, seien nur einige wenige kurz beschrieben. Man verbindet die Pole der Sekundärspule des Transformators mit einem Entlader (Funkenmesser). Schiebt man zwischen die Pole des Entladers ein längeres Holzbrett, auf dem sich eine Schlange aus Magnesiumpulver befindet, so erhält man schöne, glänzende Funken. Man nähert die Elektroden des Funkenmessers (zwei Metallspitzen) einander bis auf etwa 3 cm und bringt eine dicke Glasplatte zwischen sie. Diese wird in kurzer Zeit durchlöchert. — Verbindet man mit der Funkenstrecke zwei dünne, parallel laufende Kupferdrähte, die 15 bis 25 cm Abstand haben, so bildet sich zwischen den Drähten ein Lichtband; dieses wird heller, wenn man die Hand der Ebene der Drähte nähert.

Die physiologischen Wirkungen der Hochspannungsentladung erweisen sich als so gering, dass der Schlag der Spule ohne jede Unannehmlichkeit ertragen werden kann, abgesehen von einem durch die Entladung verursachten geringfügigen Schmerz durch Verbrennen, wenn man die Hand einer Klemme nähert (s. Skineffekt). Um sich vor dem Verbrennen zu schützen, nimmt man einen Metallgegenstand in die Hand.

Man befestige an die Kontakte einer Glühlampe je einen Draht, den einen verbinde man mit dem einen Pole des Transformators (der andere Pol wird mit Erde verbunden), den andern mit einem Metallkörper (z. B. einer Zange). Fasst man den Metallkörper an, nachdem man sich auf einen Isolierschemel gestellt hat, so wird der Faden der Glühlampe rotglühend. Es handelt sich

---

1) Ein kleiner Blasebalg genügt für diesen Zweck.

2) Näheres siehe Tesla: Untersuchungen über Mehrphasenströme und über Wechselströme hoher Frequenz und Spannung. Deutsche Ausgabe von H. Maser; Etienne de Fodor, Experimente mit Strömen hoher Wechselzahl und Frequenz; P. Spies, Teslas Licht der Zukunft.

hier um Ladungsströme, die in den menschlichen Körper fliessen; diese haben, obgleich die Kapazität eine sehr kleine ist, eine grössere Intensität, weil die Spannung und die Frequenz ausserordentlich gross sind [1]).

Verbindet man die beiden sekundären Klemmen des Transformators mit zwei parallelen Metallplatten, die sich gegenüberstehen, so erhält man ein elektrisches Wechselfeld. Bringt man in dieses eine evakuierte Röhre, so leuchtet dieselbe [2]). Es handelt sich hierbei keineswegs, wie Tesla angibt, um elektrostatische Effekte, sondern um Ausgleichserscheinungen, um wirkliche Strömungen in den Röhren (Bewegungen der im Wechselfeld mit grosser Geschwindigkeit bald nach der einen bald nach der anderen Richtung getriebenen Ionen des Gases). Die evakuierten Röhren, Kugeln oder dergl. leuchten auch dann im Wechselfelde, wenn sie keine Elektroden enthalten.

Tesla befestigte an der Decke des Zimmers isolierte Drähte, die mit dem einen Pole eines Transformators verbunden wurden; der andere Pol wurde zur Erde abgeleitet. Die Personen, die sich in dem Raume aufhielten, spürten von den Wirkungen nichts; elektrodenlose Röhren, die sie in die Hand nahmen, leuchteten (Teslas „Licht der Zukunft").

Es genügt, eine elektrodenlose Röhre dem Transformator zu nähern, um sie zum Leuchten zu bringen. Bewegt man eine solche Röhre schnell hin und her, so sieht man sie mehrere Male. Statt die Lampe in das Wechselfeld zu bringen, kann man sie mit zwei Metallbelegungen (Metallringen) versehen und diese mit der Hochspannungsspule verbinden. Die Röhren leuchten jetzt sehr hell (Crookes Kondensatorlampe).

Schliesslich sei noch die Ebertsche Phosphoreszenzlampe erwähnt. Sie ist, wie man aus Fig. 173 erkennt, mit zwei äusseren Belegungen versehen. Im Innern befindet sich eine

---

1) In der Formel $J = 2\pi\, n\, C \, . \, E$ ist also C sehr klein, dagegen sind n (Frequenz) und E (Spannung) sehr gross.

2) Nennt man die effektive Spannung zwischen den Platten E, und beträgt ihr Abstand n cm, so ist das Potentialgefälle pro 1 cm gleich $\frac{E}{n}$. Wird die Röhre so gehalten, dass ihre Achse senkrecht zu den Platten steht, und ist die Länge der Achse l cm, so ist das Gefälle in der ganzen Röhre $\frac{l\,E}{n}$. Soll die Röhre leuchten, so muss diese Spannung, an die Enden der Röhren angelegt, genügen, die Röhre zum Leuchten zu bringen. Siehe auch Verschiebungsströme (S. 323).

aus einer stark fluoreszierenden Substanz hergestellte Kugel. Diese Lampe sendet sehr schönes, helles Licht aus, wenn man die beiden Belegungen mit den Polen des Transformators verbindet.


Fig. 173.

6. Faraday, Maxwell, Hertz. Wenn in einem Leiter elektrische Schwingungen erzeugt werden, so entstehen in dem den Leiter umgebenden Medium (dem Äther) elektromagnetische Wellen (s. S. 327), die sich nach allen Richtungen hin ausbreiten. Die Existenz dieser Wellen wurde von Hertz durch seine berühmten Versuche nachgewiesen. Durch diese wurde ein sicherer Beweis für die Richtigkeit der Faradayschen Hypothesen sowie für die Folgerungen geliefert, die Maxwell aus den Anschauungen Faradays zog. Der Besprechung der Hertzschen Versuche soll eine möglichst kurze Darlegung der Faraday-Maxwellschen Lehre vorausgeschickt werden.

Für Faraday [1]) ist der Sitz der elektrischen Kraft nicht die geladene Kugel, sondern das diese Kugel umgebende Medium, das Dielektrikum. Die Wirkung pflanzt sich von Teilchen zu Teilchen in dem Dielektrikum fort. Wir wollen den einfachen Fall betrachten, dass zwei sehr gut isolierte Kugeln *A* und *B* (s. Figur 174) [2]) geladen sind, die eine positiv, die andere negativ. *a* sei eine sehr kleine mit einer elektrostatischen Einheit geladene Kugel, von der wir

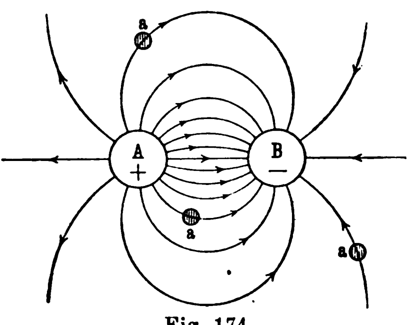


Fig. 174.

1) Man vergl. die Darlegungen auf S. 29, 30, 43.

2) Entnommen dem Werkchen: Elektromagnetische Schwingungen und Wellen. Von J. Geitel (Die Wissenschaft, Heft 6).

der Einfachheit halber annehmen wollen, dass sie von der Erde nicht angezogen werde. Auf *a* werden in jedem Punkte der Umgebung der grossen Kugeln Kräfte ausgeübt, *a* bewegt sich auf einer Kurve, einer Kraftlinie. Faraday, ein Feind der Annahme von unvermittelten Fernkräften, stellt die Hypothese auf, dass die Kraftwirkungen im Felde eine Folge eines Zwangszustandes[1]) seien, in den das Medium (Dielektrikum) versetzt wird, wenn *A* und *B* geladen werden. Er ist verschieden von dem magnetischen Zwangszustande. Er ist nicht überall gleichzeitig in dem Momente vorhanden, in dem die Kugeln elektrisiert werden, sondern er ist an einer entfernteren Stelle des Feldes später vorhanden als an einer näheren. Es fragt sich nun, mit welcher Geschwindigkeit sich der Zwangszustand ausbreitet.

„Wenn wir einen Körper in schnellem Wechsel positiv und negativ laden, schwankt dann die anziehende oder abstossende Kraft in allen Entfernungen gleichzeitig? Oder treffen die Schwankungen um so später ein, je mehr wir uns von dem Körper entfernen? Im letzteren Falle würde sich die Wirkung der Schwankung als eine Welle im Raume ausbreiten[2]). Gibt es solche Wellen?" Ähnliches gilt für den magnetischen Zustand. „Wenn wir einen Elektromagneten plötzlich durch den Strom erregen, wird dann seine Wirkung sofort bis zu den grössten Entfernungen verspürt? Oder trifft sie zunächst die benachbarten Nadeln, dann die folgenden, endlich die ganz entfernten?"

Wenn das Feldmedium sich bei den elektrischen (und magnetischen) Vorgängen nicht rein passiv verhält, vielmehr seine Zustandsänderung die Ursache für die Kraftwirkungen ist, so ist zu erwarten, dass die Natur des Feldmediums von Einfluss auf die Grösse der Kraftwirkung ist. Dass dies der Fall ist, wurde früher gezeigt (s. Dielektrizitätskonstante).

Das Feld kann man sich in Röhren, Kraftröhren, zerlegt denken, deren Wandungen von Kraftlinien gebildet werden

1) Ein Stahldraht, der gedehnt wird, befindet sich in einem Zwangszustand, ebenso eine rotierende Masse, ein Gas in einem abgeschlossenen Raume. Der elektrische Zwangszustand wird verursacht durch eine von Faraday nicht näher definierte „elektrische Verschiebung" (im Feldmedium).

2) Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. Vortrag von H. Hertz.

und deren Enden Stücke der Kugeloberflächen *A* und *B* sind [1]). Jede Röhre verbindet also zwei Oberflächenstücke, auf denen sich entgegengesetzte Ladungen befinden. Werden diese Stücke so gewählt, dass auf jedes eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge kommt, so nennt man die Röhren Einheitsröhren. (Eine solche kann man natürlich als ein Bündel von dünneren Röhren ansehen.) Die die beiden Körper verbindenden Einheitsröhren haben das Bestreben, sich zu verkürzen, ohne dass sie aber, falls die „Ladungen" einen gewissen Wert nicht überschreiten (Funkenentladung), sich von den Oberflächen loslösen; sie verhalten sich also ähnlich wie gespannte Kautschukfäden. Eine Folge der Tendenz der Kraftröhren, sich zusammenzuziehen ist die, dass sie einen seitlichen Druck aufeinander ausüben. Die elektrisch geladenen Kugeln werden sich offenbar um so stärker anziehen [2]), je stärker sie geladen sind, d. h. je mehr Einheitsröhren vorhanden sind. Die Kraftlinien in Fig. 174 können also auch als elektrische Spannungslinien bezeichnet werden. Die Zugwirkung im Feldmedium (Äther) wird von Teilchen zu Teilchen vermittelt.

Wie in zwei Körpern, die durch gespannte elastische Fäden miteinander verbunden sind, Energie aufgespeichert ist (der Sitz der Energie sind natürlich die Fäden, nicht die Körper), so auch in einem System elektrisierter Körper [3]). Der Sitz der Energie ist das in den Zwangszustand versetzte Dielektrikum. Als einfachsten Fall wählen wir für die folgenden Betrachtungen einen aus zwei parallelen Platten bestehenden Kondensator. In Fig. 175 (S. 322) sind die Platten mit *A* und *B* bezeichnet, die gestrichelten Linien entsprechen den Kraftlinien bezw. Kraftröhren. Schneidet man die Kraftröhren durch

1) Ist nur ein geladener Körper in einem Raume (Zimmer) vorhanden, so gehen die Kraftlinien, daher auch die Röhren, besonders nach den anwesenden Leitern hin (Influenzelektrizität).

2) Obschon die übliche Ausdrucksweise streng genommen jetzt nicht mehr zutreffend ist — denn statt „Ladungen" haben wir „Kraftröhren" —, so soll sie doch beibehalten werden.

3) Wegen der Influenz gibt es einen einzigen elektrisierten Körper nicht.

Niveauflächen (ausgezogene Linien) senkrecht, so wird das ganze Feld in Zellen zerlegt (Maxwells elektr. Zellen). Auf jede Zelle kommt ein gewisser Teil der Feldenergie; die Niveau-

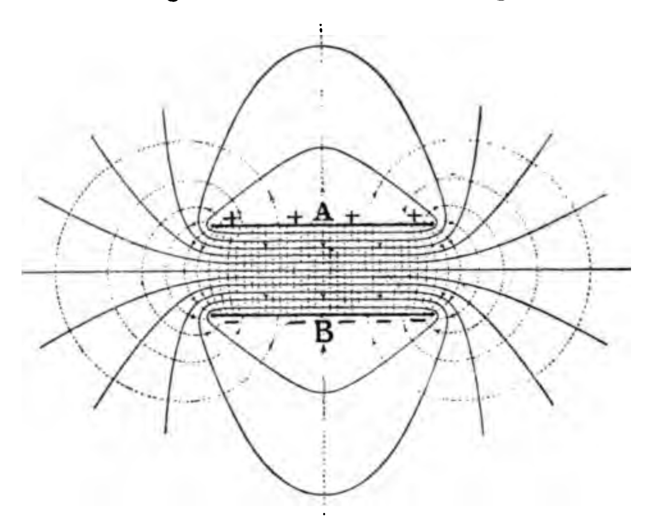


Fig. 175.

flächen seien so gelegt, dass jeder Zelle eine Energieeinheit (1 Erg) entspricht. Zwischen den Kondensatorplatten sind die Zellvolumina gleich, am Rande und ausserhalb sind sie grösser als innerhalb. Sind e Einheitsröhren vorhanden und kommen auf jede U Zellen[1]) (mit je 1 Erg Energieinhalt), so ist „die in dem Kondensator aufgespeicherte Energie" e.U; 2U nennt man die Potentialdifferenz des Kondensators.

Maxwell nimmt an, dass sich in einem Nichtleiter oder Dielektrikum die überall in gleicher Menge vorhandenen Elektrizitäten (+ und —) nur im Innern der kleinsten Teilchen verschieben können[2]). In dem Dielektrikum zwischen den beiden Kondensatorplatten (Fig. 175) wirkt eine Spannung (Verschiebungskraft) von oben nach unten. In jedem Raumteile wird bei der Ladung positive Elektrizität im Sinne der Kraft nach unten verschoben, negative dagegen gegen das Spannungsgefälle nach oben gezogen. An der

1) In der Figur ist $U = 12$.

2) In einem Leiter kann sich die Verschiebung auf beliebig weite Wege erstrecken.

unteren Wand jeder Zelle, die eine bestimmte Anzahl von Teilchen umfasst, wird nur positive, an der oberen nur negative Elektrizität vorhanden sein. Jedes Teilchen und daher auch jede Zelle ist an den Enden polar verschieden — dielektrische Polarisation. Wir werden hier an die Molekularmagnete erinnert (s. S. 24).

Schiebt man zwischen die Platten *A* und *B* einen Leiter der Elektrizität, so zerschneidet er einen Teil der Kraftröhren, das eine Stück geht von *A* bis zur (oberen) Oberfläche des Leiters, das zweite von der (unteren) Oberfläche bis nach *B*. Da nun die Oberflächenstücke, an denen Kraftröhren enden, als negativ geladen zu bezeichnen sind, und solche Stücke, von denen die Kraftröhren ausgehen, positiv elektrisch genannt werden, so wird die *A* zugewendete Seite des Leiters negativ, die *B* zugewendete positiv elektrisch (Erklärung der Influenzelektrizität). Für Influenz gebraucht man in England vielfach den Ausdruck „induction"; man nennt daher die Kraft- (die Spannungs-)Linien auch Induktionslinien.

Wird der Zwangszustand über einen gewissen Grad hinaus gesteigert, so tritt, wie bei gespannten Gummifäden, wenn man die Elastizitätsgrenze überschreitet, ein mehr oder weniger plötzliches Nachgeben des Dielektrikums ein — elektrische Entladung.

Erzeugt man an den Enden eines Leiters eine Potentialdifferenz, so werden zwar auch Kraftröhren erzeugt, diese aber verschwinden sofort wieder, indem sich ihre Energie in Wärme umsetzt. Im Innern leitender Massen können also elektrische Kraftröhren im Gleichgewichtszustande nicht vorhanden sein.

Als idealer Isolator wäre derjenige zu bezeichnen, in dem unbegrenzte Zeit hindurch ein Feld erhalten bliebe; ein idealer Leiter wäre jener, in dem die Umwandlung der elektrischen Energie (unter Verschwinden der Kraftröhren) unendlich schnell erfolgte.

Verschiebungsströme. Denken wir uns den in Figur 175 abgebildeten Kondensator in der Entladung begriffen, seine beiden Platten also durch einen Draht miteinander verbunden, so verschwindet der Spannungszustand im Felde und gleichzeitig die dielektrische Polarisation. Es müssen also beim Entspannen (Entladen) die vorher (bei der Ladung, der Spannung) getrennten Elektrizitäten wieder zusammenfliessen. Es entsteht ein System von Elementar-

strömen (innerhalb der kleinsten Teilchen des Dielektrikums). Diese Ströme, die auch bei der Ladung des Kondensators, natürlich im umgekehrten Sinne, im Dielektrikum auftreten, nennt Maxwell Verschiebungsströme. (Bei einem Leitungsstrome fliesst die Elektrizität auch von Teilchen zu Teilchen.) Wird also unser Kondensator geladen dadurch, dass man seine Belegungen mit den Polen einer Stromquelle verbindet, so setzen die Verschiebungsströme gewissermaßen den in den Zuleitungsdrähten fliessenden Ladungsstrom fort. „In der Maxwellschen Theorie gibt es also keine ungeschlossenen Ströme, die Verschiebungsströme überbrücken die Nichtleiter, in denen die Leitungsströme enden.“ [1])

Für die magnetischen Kraftlinien bezw. Kraftröhren Faradays gilt Analoges wie für die elektrischen. Jedoch besteht ein wichtiger Unterschied zwischen beiden darin, dass die magnetischen Kraftröhren in sich geschlossen sind [2]), während bei den elektrischen Anfang und Ende nicht zusammenfallen, vielmehr um so weiter voneinander entfernt sind, je grösser der Abstand der elektrisierten Körper ist (z. B. der Kugeln *A* und *B* in Fig. 174 S. 319). Man kann die magnetischen Kraftröhren daher auch als Kraftringe bezeichnen.

Wir fassen eine Stelle des magnetischen Feldes ins Auge, wo die Feldstärke gleich Eins ist. Durch die betreffende Stelle denken wir uns eine Fläche von 1 cm² senkrecht zur Richtung der Kraft gelegt. Einen Ring, der diese Fläche als Querschnitt hat, nennen wir Einheitsring. An einer Stelle des Feldes, wo die Feldstärke gleich 2 ist, kommen also auf 1 cm² senkrecht zur Kraftrichtung zwei Einheitsringe etc.

Wie das elektrische Feld, so repräsentiert auch das magnetische eine gewisse Energiemenge. Die Einheitsringe denken wir uns durch Niveauflächen in Einheitszellen zerlegt, deren jede einen Energieinhalt von 1 Erg hat.

Wird ein geradliniger Leiter von einem elektrischen Strome durchflossen, so wird er von kreisförmigen Kraftröhren (siehe

---

1) H. Ebert, Theorie des Elektromagnetismus. (Handbuch der Elektrot. I, 3).

2) Man vergleiche S. 19.

S. 91) umschlossen, der Leiter steht auf den Ebenen der Kraftröhren senkrecht. Bei einem kreisförmigen Leiter (Windung) umschliessen die Kraftröhren ebenfalls den Leiter, sie stehen überall auf der Ebene des Leiters senkrecht. Man sagt, dass die Kraftringe mit dem Leiter verkettet sind.

Die Erscheinungen der Selbstinduktion (s. S. 124) lehren uns, dass das einem Strome entsprechende magnetische Feld nicht plötzlich (bei Stromschluss) entsteht und vergeht (bei Stromunterbrechung), sondern dass die Entstehung und das Verschwinden Zeit erfordernde Vorgänge sind.

Wir haben gesehen, dass bei der Entladung eines Kondensators elektrische Schwingungen entstehen. Diesen Vorgang wollen wir jetzt noch einmal unter Benutzung der neu eingeführten Begriffe betrachten. Die beiden Platten eines geladenen Kondensators mögen durch einen Draht miteinander verbunden werden. Es entsteht sofort ein Leitungsstrom, es verschwinden (elektrische) Einheitsröhren, und es werden magnetische Kraftringe erzeugt. Das magnetische Feld steigt mit dem Strome an, in ihm wird Energie aufgespeichert. Bald erreicht der Strom den Wert, den er dem Ohmschen Gesetze nach haben müsste (s. S. 301). Dieser Strom würde nun weiter fliessen, wenn e konstant bliebe. Da aber e abnimmt, so muss die Stromstärke sinken. Jetzt wird von dem magnetischen Felde Energie abgegeben, dem Stromträger zurückerstattet, sie erscheint z. T. als Wärme, z. T. als Leitungsstrom, z. T. als elektrische Energie eines Verschiebungsstromes. Der Strom wird also weniger stark abfallen, als man erwartet. Bald wird die Feldenergie und die ursprüngliche Energie des Kondensators[1]) verschwunden sein. Diese letztere ist aber keineswegs ganz in Wärme umgesetzt worden. Ein Teil derselben lieferte nämlich einen Verschiebungsstrom im Dielektrikum, der im entgegengesetzten Sinne verläuft wie der während der Ladung des Kondensators vorhandene. Dem neuen Verschiebungsstrom entspricht eine neue Ladung des Kondensators im entgegengesetzten Sinne. Es wiederholt sich also der eben beschriebene Vorgang im entgegengesetzten Sinne (elektrische Schwingungen).

Die Faradayschen Ideen wurden von Maxwell nicht nur in ihrer ganzen Tragweite erkannt, sondern auch, wie sich schon aus dem Vorhergehenden ergibt, erweitert und in ein mathematisches Gewand gekleidet. Der Punkt, in dem sich

1) Die Energie des Kondensators in der ursprünglichen Form.

die Faraday-Maxwellsche Theorie von der Theorie der unvermittelten Fernwirkung — eine solche nimmt die Fluidumstheorie an — unvereinbar unterscheidet, liegt in der Forderung einer endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen und magnetischen Zwangszustandes. Diese Forderung ergibt sich aus den Faradayschen Anschauungen als logische Folge. Über die Art der Ausbreitung und ihre Geschwindigkeit sagt Faradays Theorie nichts aus; hierauf geben erst die Maxwellschen Gleichungen Auskunft. Soweit dies in einem populär wissenschaftlichen Buche möglich ist, sollen einige der Resultate, zu denen Maxwell gelangte, dargelegt werden.

Sowohl der elektrische wie auch der magnetische Zwangszustand kann für sich bestehen (geladener Kondensator, permanenter Magnet). Jedoch hat immer die Änderung des einen Zwangszustandes ein Auftreten des anderen zur Folge.

Dass eine Änderung des elektrischen Zwangszustandes, z. B. die Entladung eines Kondensators, das Auftreten eines magnetischen Zwangszustandes (magnetischen Feldes) zur Folge hat, sieht man leicht ein; nicht so einleuchtend ist der umgekehrte Satz. Wir betrachten in der Nähe eines Magnets einen beliebigen, etwa ringförmigen, Raumteil V. Ist dieser mit einem in sich geschlossenen Leiter (Drahtring) ausgefüllt, so entsteht bei Änderung des magnetischen Zwangszustandes ein Leitungsstrom, dem ein elektrischer Zwangszustand entspricht; wird der Drahtring geöffnet, so entsteht in dem Leiter ein Leitungsstrom und in dem Dielektrikum zwischen den Drahtenden ein Verschiebungsstrom, der den Leitungsstrom fortsetzt. Befindet sich kein Leiter in V und verschwindet ein Teil der mit V verketteten Kraftringe, so entsteht ein in sich geschlossener Verschiebungsstrom.

Die durch die Änderung eines Zwangszustandes verursachte Störung des anderen breitet sich immer weiter aus.

Wenn in unserem Raumteile V infolge einer zeitlichen Änderung des magnetischen Zwangszustandes ein elektrischer Zwangszustand auftritt, so bedeutet das, dass sich in V der elektrische Zwangszustand ändert. Zu einem in V auftretenden Leitungs- bezw. Verschiebungsstrom gehören neue magnetische Kraftringe; diese sind mit einem V benachbarten Raumteile, etwa einem zweiten Ringe V′ verkettet. Daher müssen auch in V′ Leitungs- oder Verschiebungsströme entstehen. Der Vorgang wiederholt sich also

immer wieder, es werden immer neue, weiter entfernt liegende Raumteile in Mitleidenschaft gezogen, ähnlich wie es bei der Ausbreitung des Lichtes der Fall ist. Hierbei findet eine fortgesetzte Verwandlung magnetischer Energie in elektrische statt. Das eben Gesagte gilt natürlich auch noch, wenn wir die Raumteile so klein wählen, dass wir sie als Punkte ansehen können.

Wir wollen jetzt annehmen, dass die Störung des magnetischen Zwangszustandes eine periodische sei. Das ist der Fall, wenn wir durch einen Leiter, etwa eine Drahtschlinge[1]), einen Wechselstrom schicken. Die Störungen pflanzen sich im Raume nach allen Richtungen hin fort. Denken wir uns also um den Mittelpunkt der Schlinge eine Kugel mit grossem Radius beschrieben[2]), so beginnen die Störungen (gleich starke, in demselben Sinne) in allen Punkten der Kugelschale zur selben Zeit. Die Störung möge sich in 1 Sekunde um v cm ausbreiten, die Periode betrage τ Sekunden. Die erste Kugelschale werde von einer zweiten umhüllt, deren Radius um das Stück $\frac{1}{4}\,v.\tau = \frac{\lambda}{4}$ grösser sei. Ist zu einer bestimmten Zeit t die Zustandsänderung auf der ersten Kugelschale im Maximum, so ist sie auf der zweiten Null; für die Zeit $t + \frac{\tau}{4}$ gilt das Umgekehrte. Denkt man sich einen Radius gezogen und in einem bestimmten Momente die Grösse der Zustandsänderung an jedem Orte durch ein Lot auf dem Radius dargestellt (alle Lote in einer Ebene), so bilden die Endpunkte der Lote einen Wellenzug; zu einer etwas späteren Zeit erhält man abermals einen Wellenzug, aber dieser ist gegen den ersteren verschoben (fortschreitende Welle). Wegen der fortwährenden Verwandlung der magnetischen Energie in elektrische, bezw. weil sich in jedem Punkte des Mediums der elektrische und magnetische Zwangszustand ändern, bezeichnet man die Welle als elektromagnetische. Den Radius nennt man einen Strahl, die elektrischen und magnetischen

---

1) Die Drahtschlinge denken wir uns der Einfachheit halber sehr klein.

2) Der Radius sei so gross, dass wir den Durchmesser der Drahtschlinge gegen ihn vernachlässigen können.

Störungen, d. h. die Richtungen des elektrischen und magnetischen Zwanges, stehen beide senkrecht zum Strahl (transversaler Charakter); jedoch fallen die beiden Richtungen nicht zusammen, sondern sie stehen senkrecht aufeinander (man vergl. S. 335).

Ist das Medium, in dem sich die Störung (die elektromagnetische Welle) ausbreitet, ein absoluter Nichtleiter, so ist die Umwandlung elektrischer Energie in magnetische (und umgekehrt) eine vollkommene; die Energie wird ohne Verlust von Schale zu Schale übertragen. Ist das Medium aber ein Leiter, oder befinden sich in ihm Leiter, so wird in diesen Energie in Wärme umgesetzt (Absorption).

Nach der Maxwellschen Theorie muss sich eine Störung des magnetischen Zwangszustandes in demselben Medium mit derselben Geschwindigkeit ausbreiten wie diejenige der elektrischen Störung. Ferner ist zu erwarten, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Natur des Mediums abhängig ist.

Die Theorie verlangt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit c in einem Dielektrikum, dessen Dielektrizitätskonstante k und dessen Permeabilität μ ist, den Wert haben muss

$$c = \frac{v}{\sqrt{k \cdot \mu}}.$$

v ist in dieser Gleichung ein Faktor, nämlich der sogenannte Verwandlungsfaktor, dessen man sich bei dem Übergang von elektrostatischen Einheiten zu elektromagnetischen bedienen muss. Aus Versuchen von W. Weber und R. Kohlrausch ergab sich, dass v ungefähr gleich $3 \cdot 10^{10}$ (s. auch S. 94). Setzen wir in obiger Gleichung $k = 1$ und $\mu = 1$ (Vakuum), so ergibt sich $c = v$.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Störungen im Vakuum (mit grosser Annäherung auch in der atmosphärischen Luft) ist also gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum. Diese Übereinstimmung konnte keine bloss zufällige sein. Maxwell geht nun weiter und gelangt zu dem Schlusse, dass das Licht eine elektromagnetische Erscheinung sei, er stellte seine berühmte elektromagnetische Lichttheorie auf. „Der Gedanke der Möglichkeit, die tausend-

fältigen Erscheinungen des Elektromagnetismus und der Optik von einem einheitlichen Gesichtspunkte aus begreifen zu können, hat etwas unwiderstehlich Bestrickendes" (Geitel, l. c. S. 68).

Auf die elektromagnetische Lichttheorie näher einzugehen, müssen wir uns versagen. Wir beschränken uns darauf, die wichtigsten Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität zusammenzustellen:

1) Drehung der Polarisationsebene in einem magnetischen Felde.

2) Das Quadrat des Brechungsexponenten ist gleich der Dielektrizitätskonstante (s. S. 44). Hier sei noch nachträglich hinzugefügt, dass für feste und flüssige Substanzen der optische Brechungsexponent insofern keine scharf definierte Grösse ist, als den verschiedenen Lichtsorten (rot, gelb etc.) verschiedene Brechungsexponenten zukommen[1]). Anders liegen die Verhältnisse bei Gasen; für ein bestimmtes Gas ist der Unterschied in den verschiedenen Brechungsexponenten sehr klein — die Dispersion ist sehr gering. Daher ist nur bei Gasen eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung zu erwarten.

3) Eine elektromagnetische Einheit der Stromstärke $= 3 \cdot 10^{10}$ elektrostatischen Einheiten (s. S. 94).

4) Das Zeemann-Phänomen (s. S. 284).

5) Die lichtelektrische Zerstreuung (s. S. 272).

6) Eigenschaft des Selens, seinen Leitungswiderstand bei der Belichtung zu ändern (s. S. 54).

7) Alle metallisch leitenden Substanzen sind undurchsichtig[2]). Auf diese Beziehung wollen wir etwas näher eingehen. Wir haben gesehen, dass Wechselströme um so mehr die an der Oberfläche eines Leiters liegenden Schichten bevorzugen, je grösser die Periodenzahl (Schwingungszahl, Frequenz) ist (siehe Skineffekt). Ist die Schwingungszahl eine sehr grosse (viele Millionen pro Sekunde, s. S. 336), so bewegt sich die Elektrizität nur noch in oberflächlichen Schichten, deren Dicke wenige tausendstel Millimeter beträgt (ein Draht verhält sich also wie ein sehr dünnes Metallrohr). Die Lichtschwingungen erfolgen noch viel rascher[3]). Gilt nun

---

1) Hier sei an die Zerlegung eines weissen Lichtstrahles in ein Spektrum erinnert (Farbenzerstreuung, Dispersion).

2) Scheinbar bildet Glas bei höherer Temperatur eine Ausnahme (s. S. 53). Hier ist jedoch zu bemerken, dass Glas den Strom elektrolytisch leitet.

3) Zusammenstellung der Wellenlängen:

ultraviolettes Licht, kürzeste gemessene Wellenlänge: 0,0001 mm,

für sie dasselbe wie für die elektromagnetischen Wellen, so muss man schliessen, dass sie nur bis zu einer ganz minimalen Tiefe in Metalle eindringen können, d. h. den elektromagnetischen Schwingungen gegenüber, die man als Licht bezeichnet, sind Metalle erst in Gestalt von sehr dünnen Blättchen durchlässig — ein Schluss, der bekanntlich durch die Erfahrung bestätigt wird.

Früher wurde von Wellen längs Drähten gesprochen; dieser Ausdruck dürfte jetzt ohne weiteres verständlich sein.

Hertz vergleicht in seinem berühmten Heidelberger Vortrag die Maxwellsche Theorie mit einem Gewölbe, das eine Kluft unbekannter Dinge überspannt. Dieses Gewölbe bedurfte aber wegen seiner grossen Spannweite eines kräftigen Pfeilers. Ein solcher Pfeiler, sagt Hertz, wäre der Nachweis gewesen, dass es Wellen elektrischer und magnetischer Kraft gibt, die sich nach Art der Lichtwellen ausbreiten. War denn dieser Nachweis so schwierig? Allerdings! Man muss nämlich bedenken, dass sich die elektrischen und magnetischen Störungen mit enormer Geschwindigkeit ausbreiten, dass man vor Hertz keine Mittel kannte, die Existenz von elektromagnetischen Wellen sichtbar zu machen. Ferner galt es Mittel und Wege zu ersinnen, wie man so kurze Wellen erzeugt, dass man mit ihnen in einem Saale experimentieren kann.

Die mit Hülfe von Leydener Flaschen erzeugten Wellen haben eine nach vielen Metern messende Wellenlänge. v. Bezold[1]) hatte schon 19 Jahre vor Hertz Beobachtungen gemacht, die für die Existenz schnellerer Schwingungen in kurzen Leitern sprechen. Durch Verkleinerung der Kapazität und der Selbstinduktion gelang es Hertz, Wellen zu erzeugen, die nur 6 cm Länge hatten.

7. **Die Hertzschen Versuche.** 1) Die Kugeln eines Funkenmikrometers sind durch Drähte L (s. Fig. 176) mit den Kugeln C verbunden, die die Kapazität repräsentieren. Dem Oszillator — so nannte Hertz das primäre System —

---

sichtbares Licht von $\lambda = 0{,}00033$ mm bis $\lambda = 0{,}000683$ mm,

ultrarote Strahlen (Wärmestrahlen), längste gemessene Wellenlänge: 0,061 mm,

elektromagnetische Wellen, kürzeste gemessene Wellenlänge: 4 mm. Der längsten Welle ($\lambda = \infty$) entspricht Gleichstrom.

1) Untersuchungen über elektrische Entladungen. Pogg. Ann. 140, S. 541 (1870).

wurde aus einem Funkeninduktor Energie zugeführt. Das Drahtrechteck[1]) mit der Funkenstrecke *ab* wird mit dem Oszillator verbunden. Liegt die Anschlussstelle nahe bei *a*, so erhält man zwischen *a* und *b* mehrere Millimeter lange Fünkchen. Der Anschlusspunkt macht nämlich die Potentialschwankungen des Oszillators mit, diese pflanzen sich über *d* nach *b* hin fort. Die hierzu erforderliche Zeit sei τ. Wenn sich nun während der Zeit τ das Potential in *c* (bezw. *a*) stark ändert, so besteht zwischen *a* und *b* eine grössere Potentialdifferenz, die sich in Gestalt eines Fünkchens ausgleichen wird. Beobachtet man umgekehrt, dass zwischen *a* und *b* Fünkchen überspringen, so muss man schliessen, dass die Potentialschwankungen des Oszillators mit ausserordentlich grosser Geschwindigkeit erfolgen, da τ sehr klein ist.

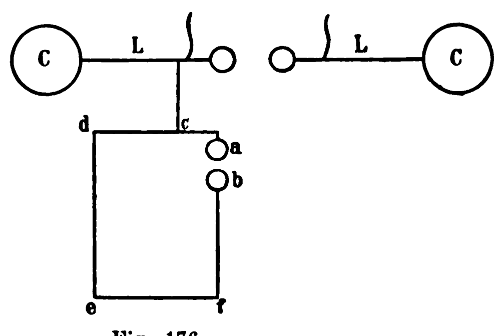


Fig. 176.

Verschiebt man den Anschlusspunkt nach *e* hin, so werden die Fünkchen kleiner bezw. verschwinden ganz. — Verbindet man das Drahtrechteck mit einem Thomsonschen Schwingungskreis (mit Leydener Flasche), so beobachtet man keine oder doch nur ganz kleine Fünkchen. Die Potentialschwankungen in der Zeit τ sind in diesem Falle klein, da die Schwingungszahl klein ist.

2) Durch einen zweiten Versuch wurde der Nachweis erbracht, dass die Änderungen der Oszillatorspannung periodische sind, oder dass bei der Funkenentladung sehr schnelle elektrische Schwingungen auftreten. Der Oszillator war dem in Fig. 176 skizzierten ähnlich; das Drahtrechteck war jedoch

1) Man kann einen beliebig geformten gut isolierten Draht benutzen, dessen Enden mit einem Funkenmikrometer verbunden werden. — Am günstigsten liegen die Verhältnisse, wenn die Drahtlänge gleich der halben Wellenlänge ist.

mit dem primären System nicht leitend verbunden[1]). Auch jetzt wurden sekundäre Fünkchen beobachtet, selbst noch bei 1,5 m Abstand des Drahtrechtecks vom Oszillator. Ferner ergab sich, dass die Fünkchen eine maximale Länge hatten, wenn der Draht, aus dem das Rechteck gebildet war, eine ganz bestimmte Länge hatte ($l = \frac{\lambda}{2}$). Schaltet man bei der günstigsten Drahtlänge parallel zur sekundären Funkenstrecke einen kleinen Plattenkondensator, so werden die Fünkchen schwächer. Die Versuche ergaben also, dass, wenn man günstigste Wirkung erzielen will, der sekundäre Kreis auf den Oszillator abgestimmt sein muss. Aus dem Vorhandensein einer Resonanzbedingung muss auf den oszillatorischen Charakter der Funkenentladung geschlossen werden.

3) Versuche über stehende elektromagnetische Wellen. Wird mit dem einen Metallkörper des Hertzschen Oszillators (*C* in Fig. 176) ein langer, frei endigender Draht verbunden, so pflanzen sich die Wellen längs des Drahtes fort, und es bilden sich stehende Wellen (s. S. 309). Mittels des abgestimmten Drahtrechtecks kann man die Knoten und Bäuche bestimmen. Der Abstand zweier aufeinanderfolgenden Bäuche ist $\frac{\lambda}{2}$. Hertz berechnete aus der Kapazität und der Selbstinduktion des Oszillators die Schwingungszahl n. Für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ($v = n\lambda$) ergab sich der Wert 280 000 km (nahezu Lichtgeschwindigkeit).

Um die elektrischen und magnetischen Wellen gesondert nachzuweisen, bediente sich Hertz bei seinen späteren Versuchen[2]) der Lecherschen Anordnung. Den Metallplatten P_1 und P_2 des Oszillators (s. Fig. 177) stehen zwei andere Metallplatten in kleinem Abstande gegenüber. Letztere werden durch Influenz elektrisch. Jeder Änderung des elektrischen

---

1) Die grössere Seite *de* parallel *L*, die sekundäre Funkenstrecke in der Mitte der *de* gegenüberliegenden Seite.

2) Wiedem. Annalen 42, S. 407, 1891.

Zustandes von P_1 entspricht eine solche auf P_2. Die im Äther sich ausbreitenden elektromagnetischen Wellen benutzen die Drähte als Stützpunkte; das elektrische und magnetische Feld befindet sich hauptsächlich in dem Raume zwischen den beiden Drähten. Werden die Drähte an den Enden leitend miteinander verbunden, so ist die betreffende Stelle stets ein Spannungsknoten. Die langsamen, der Unterbrechungszahl des Induktionsapparates entsprechenden Schwingungen [1], die bei den Untersuchungen störend wirken, können nach Lecher dadurch unschädlich gemacht werden, dass man die Drähte an zwei gegenüberliegenden Knotenpunkten durch einen leitenden Bügel (aufgelegten Kupferdraht) überbrückt. Die elektrischen und magnetischen Kräfte zwischen den Drähten wurden von Hertz mittels sehr empfindlicher, von ihm konstruierter Apparate gemessen. Es ergab sich, dass, wie es die Maxwellsche Theorie verlangt, an denjenigen Stellen die magnetische Kraft einen grössten Wert hat, an denen die elektrische Kraft gleich Null ist, und dass die Richtungen der beiden Kräfte aufeinander senkrecht stehen.

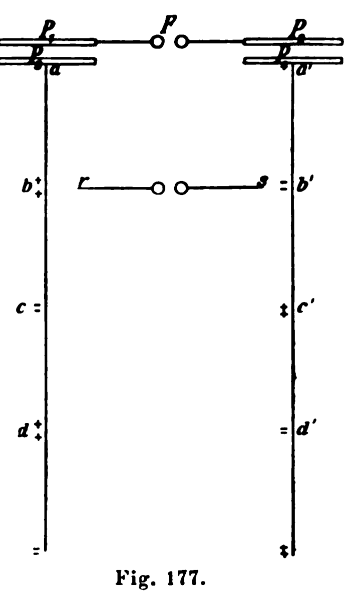


Fig. 177.

1) Die Unterbrechungszahl des Induktoriums sei n (pro Sekunde). Nehmen wir an, dass der Abstand der Kugeln des Funkenmikrometers so gross gewählt sei, dass keine Funken überspringen. Es wird dann P_1 in 1 Sekunde n-mal positiv und n-mal negativ geladen, daher auch die gegenüberliegende Platte P_3. Durch jeden der beiden Drähte $a\,d$ und $a'\,d'$ fliesst also n-mal positive und n-mal negative Elektrizität. Die Ströme kann man als langsame Schwingungen bezeichnen. Auf einem der Drähte ist in einem bestimmten Momente das Potential nahezu überall dasselbe. Eine Geisslersche Röhre, die man mit den Drähten verbindet, leuchtet überall gleich stark.

Etwas Analoges gilt für geschlossene (gedeckte) Pfeifen. Das geschlossene Ende ist in Bezug auf den Druck des Gases in der Pfeife ein Bauch (grösste Druckvariationen), dagegen in Bezug auf die Bewegung der Luftschichten (Luftstromstärke) ein Knoten.

Die Änderungen der elektrischen Kräfte wurden auch mittels eines abgestimmten Drahtrechtecks nachgewiesen. In der Fig. 177 sieht man von diesem nur die obere Seite *rs* mit der Funkenstrecke. Die Ebene des Rechtecks steht also senkrecht zur Zeichenebene.

Die Existenz von stehenden elektrischen Wellen kann man mittels der folgenden einfachen Versuchsanordnung nachweisen. Statt der beiden Plattenpaare benutzt man zwei kleine Leydener Flaschen; Verfasser verwendet die zu einer mittelgrossen Influenzmaschine gehörigen[1]. Die Flaschen werden isoliert aufgestellt (eingeklemmt, Stativ). Die beiden mit den äusseren (oder inneren) Belegungen verbundenen 5—6 m langen Drähte (5—6 cm Abstand) werden mit einer auf zwei Wandklammern liegenden Eisenstange verbunden. Die Drähte werden in einiger Entfernung von der Wand (möglichst in einem Bauche für die elektrische Kraft) durch eine Geisslersche oder eine elektrodenlose Röhre miteinander verbunden. Man legt endlich einen dicken Kupferdraht quer auf die Drähte und verschiebt diesen. Die Röhre leuchtet, wenn der Draht zwei sich gegenüberliegende Knoten miteinander verbindet. Man kann leicht, wenn die Flaschen klein und die primären Drähte kurz sind, 3—4 Knoten auffinden.

Um die Spannungsknoten und Bäuche sichtbar zu machen, bedient man sich vielfach der A r o n s c h e n R ö h r e; bei dieser ist das Lechersche Drahtsystem in ein 2—3 m langes Glasrohr eingeschlossen. An den Stellen, wo sich Bäuche ausbilden, entsteht eine leuchtende Entladung zwischen den Drähten.

4) Die bis jetzt beschriebenen Versuche können auch erklärt werden, wenn man auf dem Standpunkte steht, dass die elektrischen und magnetischen Kräfte zu den unvermittelten Fernkräften gehören (indem man die Fluidumstheorie zu Hülfe nimmt). Durch seine „Versuche über die elektrodynamischen Wellen in der Luft und deren Reflexion"[2] gelang es jedoch Hertz, jeden Zweifel an der Richtigkeit der Maxwellschen

---

1) Die Funken lässt man zwischen zwei blank polierten Messingkugeln überspringen. Die Politur bewirkt einen Entladeverzug, daher auch Erhöhung der Entladespannung.

2) Wied. Ann. 34, S. 610 (1888).

Theorie zu beseitigen. Dem Oszillator gegenüber befand sich ein grosser Metallschirm aus Zink[1]. Nach der Maxwellschen Theorie müssen sich, auch wenn keine Drähte vom Oszillator nach der Metallwand hinlaufen, elektromagnetische Wellen ausbilden, und diese müssen an der Wand reflektiert werden (stehende Wellen). Als Resonator oder, wie man jetzt sagen würde, als Wellenindikator diente ein auf den Oszillator abgestimmter Drahtkreis (siehe Fig. 179).

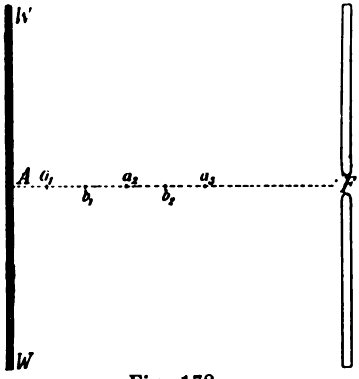
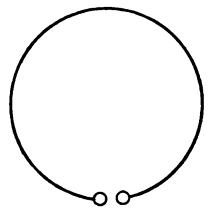


Fig. 178.

Um die Bäuche der elektrischen Kraft nachzuweisen, wurde der Resonator so angeordnet, dass sein Mittelpunkt in *AF* liegt, seine Ebene senkrecht auf *AF* steht und die Funkenstrecke in der durch *AF* gelegten Horizontalebene liegt. In der Nähe der Metallwand treten keine bezw. nur sehr kleine Fünkchen auf; sie haben ein Maximum in einem Punkte a_1, nehmen, wenn der Resonator weiter verschoben wird, wieder ab, erreichen in a_2 ein zweites Maximum etc.


Fig. 179.

Da der Abstand zweier Bäuche gleich $\frac{\lambda}{2}$, so konnte λ gemessen werden. Bei einem Versuche ergab sich $\lambda = 9{,}6$ m $=$ 960 cm. Die Schwingungszahl n wurde aus der Kapazität und der Selbstinduktion des Oszillators zu angenähert 32 Millionen berechnet. Also ist $v = 960 . 32 . 10^6$ cm $= 3072 . 10^7$ cm, d. h. (angenähert) gleich der Lichtgeschwindigkeit.

Um die Bäuche für die magnetische Kraft aufzusuchen, muss der Resonator in die durch die Oszillatorachse und das Lot *FA* bestimmte Ebene (Zeichenebene) fallen, seine Funken-

1) Hertz bekleidete eine Wand des Laboratoriums mit Zinkblech, der Abstand zwischen Oszillator und Wand betrug 13 m.

strecke muss in dem auf AF in der eben definierten Ebene errichteten Lote liegen. Die elektrische Kraft kommt jetzt nicht zur Geltung. Die Bäuche der magnetischen Kraft liegen in b_1, b_2 etc.

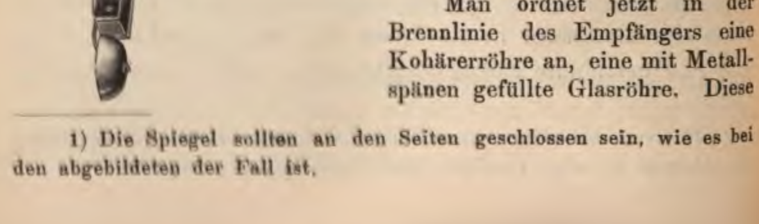


Fig. 180.

5) Durch die Hohlspiegel-Versuche wies Hertz die Wesensgleichheit der elektromagnetischen Wellen mit den Lichtwellen nach. In der Brennlinie eines parabolischen Spiegels aus Zinkblech ist der Oszillator angeordnet, der aus zwei Metallkörpern mit blank polierten Kugeln besteht (s. Figur 180). Es gelang Hertz, Wellen von 6 cm Länge zu erzielen. Die Strahlen treten parallel zur Parabelachse aus, treffen einen zweiten Spiegel und werden dort (bei zusammenfallenden optischen Achsen) in der Brennlinie vereinigt. In dieser waren Kupferdrähte montiert, deren einander zugewendete Enden mit einem hinter dem Spiegel (Empfänger) stehenden Funkenmikrometer verbunden waren. Es traten noch bei 20 m Entfernung der beiden Spiegel[1]) Fünkchen auf.

Man ordnet jetzt in der Brennlinie des Empfängers eine Kohärerröhre an, eine mit Metallspänen gefüllte Glasröhre. Diese

1) Die Spiegel sollten an den Seiten geschlossen sein, wie es bei den abgebildeten der Fall ist.

wird mit einer kleinen Batterie und einer elektrischen Klingel in Serie geschaltet (s. Figur 180). Auf die Wirkungsweise des Kohärers soll später näher eingegangen werden. Es genügt jetzt die Bemerkung, dass sich der Widerstand in den Metallspänen, der unter normalen Verhältnissen nahezu unendlich gross ist, sehr stark verringert, wenn der Kohärer bestrahlt wird. Die Empfindlichkeit des Kohärers ist übrigens, wenn man in kleinen Räumen experimentiert, eine zu grosse.

Stellt man einen grossen Metallschirm zwischen die beiden Spiegel, so spricht der Kohärer nicht an; die elektromagnetischen Wellen gehen also durch Metall nicht hindurch. Sie durchdringen aber dicke, in ihren Weg gestellte Bretter etc. [1])

Ein Drahtgitter (Fig. 181, Abstand der Kupferdrähte etwa 3 cm) wirkt gerade so wie eine Metallwand, wenn die Drähte zu den Brennlinien der Spiegel parallel laufen. Stehen sie senkrecht zu den Brennlinien, so gehen die Wellen ungeschwächt durch das Gitter. Dreht man das Gitter so, dass seine Drähte mit den Brennlinien Winkel von 45⁰ bilden, so spricht der Kohärer an. Durch diese Versuche wird der transversale Charakter der Wellen vor Augen geführt [2]).

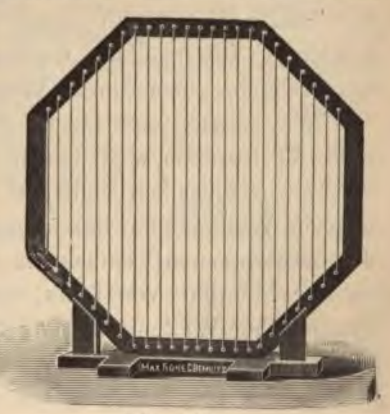


Fig. 181.

Laufen die Drähte den Brennlinien parallel, so werden sie von den magnetischen Kraftlinien geschnitten, es werden in ihnen elektrische Schwingungen erzeugt, denen neue Wellen entsprechen. In dem Raume zwischen dem Empfänger und dem Gitter haben wir zwei Wellensysteme, die sich gegenseitig vernichten. — Bei dem zuletzt erwähnten Versuche kann man sich die Amplitude der ankommenden Welle in zwei Komponenten zerlegt denken, von denen die eine in die

1) Diese letzten Versuche können auch mit Hülfe der früher beschriebenen resonierenden Flaschen angestellt werden.

2) Wenn es sich um longitudinale Schwingungen (Schall) handelte, so würde es gleichgültig sein, welche Richtung die Drähte haben.

Richtung der Drähte fällt, die andere hierauf senkrecht steht. Die zweite Komponente geht durch das Gitter etc. — Optische Analogie bei der Polarisation.

Um die Reflexion der elektrischen und magnetischen Strahlen zu zeigen, stellt man die Spiegel so auf, dass ihre optischen Achsen gegeneinander geneigt sind. Der Kohärer spricht nicht an. Stellt man den Metallschirm so auf, dass die Halbierungslinie des Winkels, den die beiden optischen Achsen miteinander bilden, senkrecht auf ihm steht, so fliesst durch die Klingel ein Strom.

Auch die Reflexion der elektromagnetischen Wellen lässt sich mit Hülfe der resonierenden Flaschen zeigen. Als Metallschirm kann man eine Pappdeckelscheibe benutzen, deren eine Seite mit Stanniol beklebt ist.

Die Brechung der elektromagnetischen Strahlen wurde von Hertz mit Hülfe eines grossen Asphaltprismas nachgewiesen. Die Strahlen werden, wenn sie durch den Asphalt hindurchgehen, von ihrem Wege abgelenkt.

Wir haben, sagt Hertz [1]), die von uns untersuchten Gebilde als Strahlen elektrischer Kraft eingeführt. Nachträglich dürfen wir dieselben vielleicht auch als Lichtstrahlen von sehr grosser Wellenlänge bezeichnen. Mir wenigstens erscheinen die beschriebenen Versuche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen. Ich glaube, dass man nunmehr getrost die Vorteile wird ausnutzen dürfen, welche sich aus der Annahme dieser Identität sowohl für das Gebiet der Optik, als das der Elektrizität ziehen lassen.

8. **Die Funkentelegraphie** [2]). Die Hertzschen Wellen für eine drahtlose Telegraphie in technisch brauchbarer Weise verwendet zu haben, ist das Verdienst des Italieners Marconi.

Marconi benutzte bei seinen ersten Versuchen den Righischen Sender ohne Verlängerungsdrähte (Antennen). Dieser ist

1) Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft. S. 196.

2) Die Funkentelegraphie. Gemeinverständliche Vorträge von A. Slaby. 1901; Otto Jentsch, Telegraphie und Telephonie ohne Draht. 1904.

in Fig. 182 schematisch dargestellt. Die kleinen Kugeln dienen nur dazu, den grossen Oszillatorkugeln Elektrizität zuzuführen. Der Zwischenraum zwischen den letzteren ist mit Öl angefüllt.

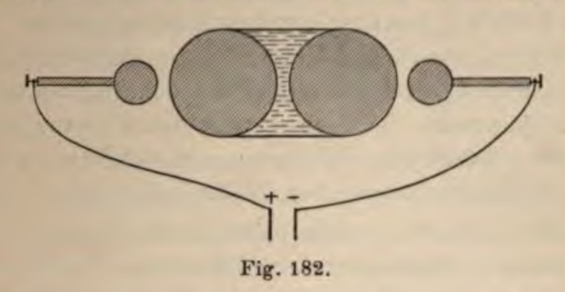


Fig. 182.

Dieses hat eine grössere Dielektrizitätskonstante als Luft, so dass grössere Elektrizitätsmengen angehäuft werden, bevor die Entladespannung erreicht ist (s. S. 43). Ferner ist die dielektrische Bruchfestigkeit des Öls grösser als diejenige der Luft, d. h. man kann eine grössere Potentialdifferenz zwischen den beiden grossen Kugeln herstellen, ehe die Entladung beginnt, als wenn der Zwischenraum mit Luft angefüllt ist. Später verwendete Marconi die Popoffsche Antenne. Popoff benutzte lange Luftleitungen in Verbindung mit dem Branlyschen Kohärer bei seinen Versuchen über atmosphärische Elektrizität. Die Antenne hat bei der Funkentelegraphie den Zweck, die Strahlung, d. h. die Energieabgabe an den Äther, zu vergrössern und eine ungehinderte Ausbreitung der Wellen zu ermöglichen. Versuche in grösserem Maßstabe fanden in Gegenwart Marconis im Jahre 1897 in England statt. Die Übertragungsweite betrug bei 20 m langen Luftdrähten 14 km, an den oberen Enden waren Zinkcylinder angebracht. Slaby und sein Assistent Graf Arco haben sich um die weitere Vervollkommnung, besonders um die Abstimmung, grosse Verdienste erworben. Die Abstimmung besteht darin, dass eine gleichzeitige Telegraphie zwischen mehreren Stationen möglich ist, ohne dass der Betrieb der einen Station durch den der anderen gestört wird. Slaby erkannte, dass die Länge der erzeugten Wellen gleich der vierfachen Länge des Senderdrahtes sein muss, um die besten Wirkungen zu erzielen. Von grossem Einflusse auf die Entwicklung der Funkentelegraphie waren auch die Untersuchungen Slabys über die Wirkung, die die Erdung des Sender- und Empfängerdrahtes auf den Erfolg ausübt. Prof. Braun benutzte den geschlossenen Schwingungskreis (s. S. 342) mit schwach gedämpften Schwingungen. Nur bei diesen ist eine vollkommene Abstimmung möglich (Resonanz). Ferner zeigte Prof. Braun, wie man die Energie des Erreger-

kreises erhöhen und so die Fernwirkung steigern kann, ohne die Koppelung (s. S. 342) zu beeinträchtigen.

Zunächst sollen einige der zahlreichen Wellendetektoren oder Wellenanzeiger beschrieben werden. Wie wir gesehen haben, werden in Leitern, die von elektromagnetischen Wellen getroffen werden, elektrische Schwingungen hervorgerufen. Apparate, die dazu dienen, das Vorhandensein der induzierten elektrischen Schwingungen sichtbar zu machen, heissen Wellendetektoren oder Wellenindikatoren.

a) Der Kohärer oder Fritter, von Branly in Paris 1891 erfunden, besteht aus einer Glasröhre, in der sich zwei Silberkölbchen befinden (s. Fig. 183 *F*), deren Zwischenraum mit Metallfeilicht angefüllt ist. Der Fritter sei mit einem Galvanoskop *G* und einem Elemente *E* zu einem Stromkreise vereinigt. Zunächst zeigt das Galvanoskop keinen Strom an, der Widerstand in den Metallkörnern ist (nahezu) unendlich. Erzeugt man in der Nähe des Kohärers elektrische Schwingungen (lässt man einen Funken überspringen), so wird der Kohärer leitend und das Galvanoskop zeigt einen Strom an. Klopft man leise gegen den Kohärer, so wird der Widerstand wieder unendlich.

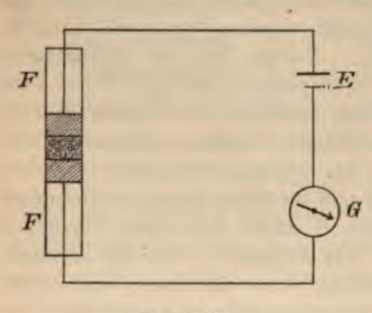


Fig. 183.

Man erklärt die Erscheinung, dass sich der Widerstand lose geschichteter Metallkörner bei der Bestrahlung durch elektromagnetische Wellen ändert, folgendermaßen. Zwischen den einzelnen Metallteilchen befinden sich ausserordentlich dünne Zwischenräume; die elektrischen Wellen erzeugen in den Zuleitungsdrähten elektrische Schwingungen, durch die Spannungen erzeugt werden. Diese gleichen sich in Gestalt von mikroskopisch kleinen Fünkchen aus. Es bilden sich Spuren von Metalldämpfen. Wenn diese sich abkühlen und erstarren, werden benachbarte Späne durch eine ausserordentlich feine Metallbrücke miteinander verbunden. Wird der Apparat er-

schüttert, so werden die Brücken zerstört[1]). — Um das Metallpulver vor Oxydation zu schützen und es trocken und daher leicht beweglich zu halten, wird die Glasröhre evakuiert.

b) Antikohärer sind Wellenanzeiger, bei denen der elektrische Widerstand durch die Bestrahlung erhöht wird. Aus Beobachtungen, die Arons und Righi gemacht hatten, ist die Schäfersche Platte entstanden. Sie besteht aus einer Glasplatte, auf der sich eine sehr dünne Silberschicht befindet. In diese werden mittels eines Gravierdiamanten feine Linien gezogen. Die mit einem Firnisüberzug versehene Platte wird in eine Glasröhre eingeschlossen, die evakuiert wird. Man nimmt an, dass die Ränder der Spalten durch einige feine Metallfäden, die durch den Diamanten nicht entfernt wurden, miteinander verbunden werden. Wird die Platte bestrahlt, so werden diese Fäden durch auftretende Fünkchen verdampft, so dass die die einzelnen Abteilungen der Silberschicht verbindenden Brücken zerstört werden. Nach der Bestrahlung kondensieren sich die Dämpfe, und es entstehen neue Brücken. — An Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit steht der Antikohärer dem Fritter nach (s. Jentsch S. 179).

c) Der Wellenindikator von Schlömilch soll der empfindlichste, auf die geringste Energie reagierende aller derartigen Apparate sein. Er besteht aus einem kleinen, mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Gläschen, in das kleine Elektroden aus Platin oder Gold hineinragen. Verbindet man die Elektroden mit einer Stromquelle, deren Spannung so hoch ist, dass dauernd ein ganz schwacher Strom durch die Zelle fliesst, so erfolgt sehr geringe Gasbildung. Gehen elektrische Wellen durch die Zelle, so wird die Gasbildung lebhafter, und ein in den Stromkreis eingeschaltetes Galvanoskop zeigt eine Verstärkung des Stromes an. Der Polarisationszellenindikator

---

1) Aus dieser Anschauung heraus ist der Name Fritter entstanden, indem nämlich das oberflächliche Zusammenschmelzen loser Substanzen als Frittprozess bezeichnet wird. Möglicherweise werden auch die Späne durch die elektrischen Kräfte etwas bewegt und zu leitenden Fasern geordnet. Unter dem Mikroskop sollen kleine Bewegungen und Fünkchen beobachtet worden sein.

findet Verwendung bei dem System Telefunken, das durch die Verschmelzung der Systeme Braun-Siemens und Slaby-Arco entstanden ist.

Ausser den beschriebenen gibt es noch magnetische[1]), bolometrische[2]) und elektrometrische[3]) Wellenanzeiger, von deren Beschreibung wegen Raummangels abgesehen werden muss.

Der Braunsche Schwingungskreis. Wenn man an die Kugeln eines Funkenmikrometers je einen frei endigenden Draht anschliesst, so erhält man einen offenen Schwingungskreis. An jedem der freien Enden bildet sich ein Spannungsbauch aus, in der Funkenstrecke selbst liegt ein Spannungsknoten. Bezeichnet man die Wellenlänge mit λ, die Länge eines der beiden Drähte mit $\mathfrak{l}$, so ist $\mathfrak{l} = \frac{\lambda}{4}$. Den zweiten Draht kann man weglassen, wenn man den betreffenden Pol der Funkenstrecke mit der Erde verbindet. Nach Slaby wird durch die Erdung eine bedeutende Steigerung der Leistung erreicht. Die Energie, die in dem offenen Schwingungskreise in dem Momente aufgespeichert ist, in dem die Entladung beginnt, ist wegen der geringen Kapazität nur eine kleine. Um grössere Energiemengen in Wirkung zu bringen, koppelt Prof. Braun die Luftleitung mit einem geschlossenen (Thomsonschen) Schwingungskreis.

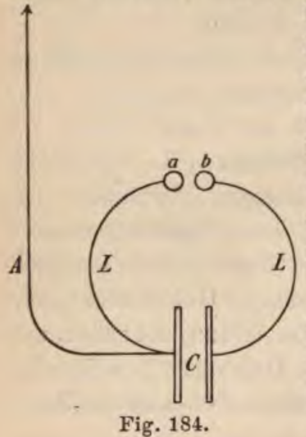


Fig. 184.

a) Die direkte oder galvanische Koppelung. Die Luftleitung A in Fig. 184 ist direkt an den Schwingungskreis, bestehend aus Funkenstrecke $a\,b$, Leydener Flasche C

1) Änderung der Hysteresis des Eisens, wenn elektrische Schwingungen durch eine Spule gehen, in der sich das Eisen befindet.

2) Änderung des Widerstandes eines sehr feinen Platindrahtes, wenn durch ihn elektrische Schwingungen hindurchgehen.

3) Haben eine gewisse Ähnlichkeit mit den Quadrantenelektrometern.

und Selbstinduktion (in der Figur repräsentiert durch die Drähte L), angeschlossen. Nennen wir die Wellenlänge des Schwingungskreises allein (also nach Loslösung der Antenne A) λ, und die Länge der Antenne $\mathfrak{l}$, so macht man $\mathfrak{l} = \frac{1}{4} \lambda$.

Durch die Koppelung ändert sich λ etwas. Mathematische Berechnungen ergaben, dass man, um möglichst günstige Wirkung zu erzielen, das Verhältnis der Antennenkapazität zur Selbstinduktion des Primärkreises möglichst gross wählen muss.

b) Die indirekte oder elektromagnetische Koppelung erinnert an die Teslasche Anordnung (s. S. 185). Die primären Schwingungen wirken induzierend auf eine sekundäre Spule S. Die Spulen Pr und S bilden den Induktionsübertrager. An die sekundäre Spule schliesst sich einerseits die Antenne anderseits eine Platte P. Diese muss so bemessen werden, dass von der Mitte der Spule S aus das Produkt aus der Kapazität und Selbstinduktion für die beiden Teile von ASP den gleichen Wert hat.

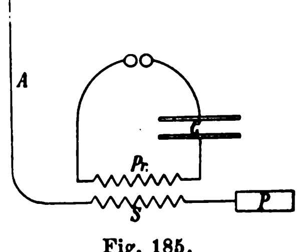


Fig. 185.

Der primäre Kreis wird auf den sekundären abgestimmt (Resonanz). Die Schwingungen des Primärkreises sind an und für sich nur schwach gedämpft, der sekundäre Teil, der Marconische Schwingungskreis, hat eine starke Dämpfung. Die beiden Kreise als Ganzes betrachtet, haben eine mittlere Dämpfung. Der primäre Kreis gibt den grössten Teil seiner grossen in ihm aufgespeicherten Energie allmählich an den sekundären ab. Man kann die Geschwindigkeit, mit der die Energie von dem einen Kreis auf den anderen übertragen wird, regulieren (lose und feste Koppelung).

Von den zahlreichen Systemen der Funkentelegraphie sollen nur folgende beschrieben werden.

Die jetzige Marconischaltung. Seit einigen Jahren verwendet Marconi ebenfalls den Braunschen Schwingungskreis (s. Fig. 186 S. 344). Die Luftleitung A ist ein einfacher Draht oder ein Drahtnetz. An die sekundäre Spule S des Übertragers

schliesst sich eine veränderliche Selbstinduktion *VS*, so dass man den sekundären Kreis auf eine bestimmte Eigenschwingung abstimmen kann. Um den Primärkreis auf den sekundären abzustimmen, wird die Kapazität, die Anzahl der Leydener Flaschen, verändert.

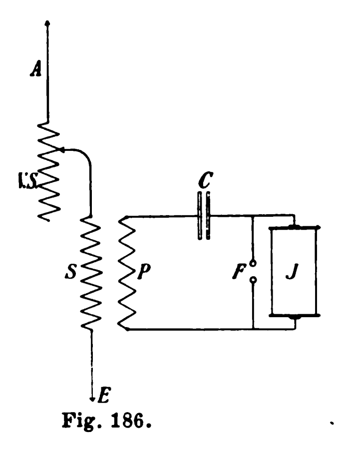


Fig. 186.

Die Schaltung auf der empfangenden Station[1]) ist in Fig. 187 abgebildet. Der Übertrager (Transformator, von Marconi Jigger genannt), zu dessen primärer Spule *P* ein Kondensator *C* parallel geschaltet ist, hat eine besondere Bauart. Die sekundäre Wickelung besteht aus zwei Rollen *I* und *II*; die inneren Enden sind mit den Belegungen eines Kondensators C_1 verbunden, die äusseren mit zwei veränderlichen Selbstinduktionen S_1 und S_2. Mit diesen

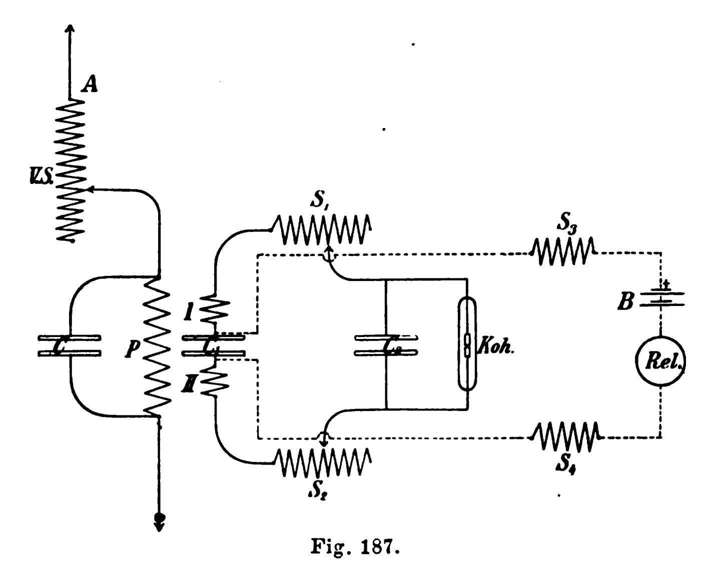


Fig. 187.

1) Der Geberdraht dient nach vorgenommener Umschaltung als Empfangsdraht; es ist also auf jeder Station nur ein Luftdraht nötig.

letzteren ist der Kohärer in Reihe geschaltet. Es wird durch Veränderung der Selbstinduktionen S_1, S_2 so eingerichtet, dass der Kohärer an zwei Spannungsbäuchen angeschlossen ist[1]).

Die Verwendung des Jiggers hat folgenden Zweck. Wenn der Kohärer ansprechen soll, so müssen an seinen Enden grosse Potentialdifferenzen vorhanden sein. Durch die Transformation wird die Spannung erhöht auf Kosten der Stromintensität.

Parallel zum Kohärer ist ein kleiner Kondensator C_2 geschaltet. Der Stromkreis, der zur Aufnahme der Zeichen dient, der Relaisstromkreis, besteht aus einer Batterie B, dem Relais und zwei Rollen von hoher Selbstinduktion S_3 und S_4; diese verhindern, dass die elektrischen Schwingungen den Weg durch den Relaisstromkreis nehmen.

Der Batteriestrom nimmt, wenn sich der Widerstand des Kohärers durch elektrische Schwingungen verringert hat (s. S. 340), folgenden Weg: von dem positiven Pole der Batterie über I, nach S_1, durch den Kohärer, nach S_2, über II, durch S_4 und das Relais zur Batterie zurück.

Der Kohärer wird entfrittet durch einen kleinen Apparat, den Klopfer. Dieser besteht aus einem Wagnerschen Hammer (s. S. 129), an dessen Anker ein dicker, federnder, passend geformter Stahldraht befestigt ist, der eine kleine Holzkugel trägt.

Das neuere System Slaby-Arco. Der Hebel des Umschalters U habe die in Figur 188 (S. 346) gezeichnete Lage. Die Station ist dann auf „Geben" geschaltet. Wird die Taste T gedrückt, so wird der Stromkreis der Batterie geschlossen. In diesen ist ein Turbinenunterbrecher (in der Figur nicht gezeichnet) und die primäre Spule des Induktionsapparates eingeschaltet. Der primäre Kreis enthält eine grosse Kapazität und eine kleine veränderliche Selbstinduktion S (Veränderung der Wellenlänge). Vergrössert man die Selbstinduktion des Primärkreises, so wird die Selbstinduktion des unteren, geerdeten, der Antenne äquivalenten Teiles[2]) verringert;

---

1) Früher schloss Marconi den Kohärer direkt an die Luftleitung an, der andere Pol des Kohärers war geerdet.

2) Man vergleiche die Bemerkungen über den Zweck der Platte P in Figur 185 auf S. 343.

um sie wieder auf die ursprüngliche Höhe zu bringen, muss man den Schieber *d* abwärts bewegen. (Die Schwingungen gehen von *d* über *g* nach *h*.)

Die Antenne ist direkt an den Primärkreis angeschlossen (galvanische Koppelung). *HF* ist eine Hülfs-(Absperr-)funken-

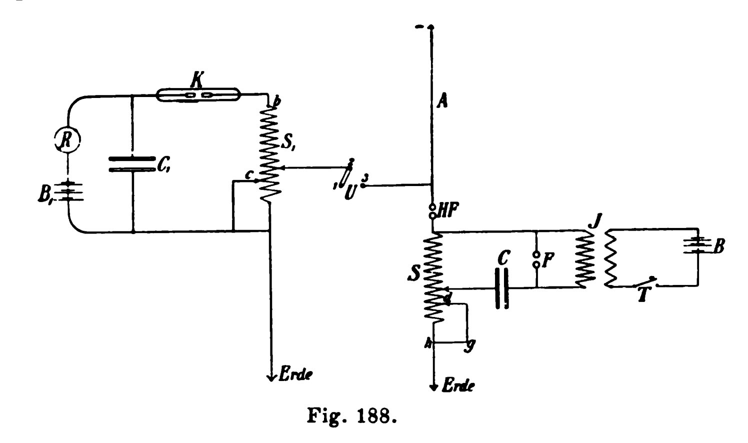


Fig. 188.

strecke. Diese hat den Zweck, den beim Empfangen in der Antenne induzierten Schwingungen den Weg in den Geberstromkreis zu versperren.

Um auf Empfangen zu schalten, dreht man den Umschalterhebel so, dass er die Kontakte 1 und 3 miteinander verbindet. Mittels der veränderlichen Selbstinduktion S_1 wird der Empfängerstromkreis auf die ankommende Welle abgestimmt. Die Schwingungen gehen von *K* nach dem Kondensator C_1; dem Relaisstrome ist der Weg über C_1 versperrt.

9. Versuche von Seibt zur Demonstration der Funkentelegraphie[1]. Zwei grössere Leydener Flaschen, eine Funkenstrecke mit Zinkelektroden und eine veränderliche Selbstinduktion werden hintereinander geschaltet. Den Flaschen, die entweder parallel oder in Reihe geschaltet werden (Veränderung

---

1) Näheres siehe Elektrot. Zeitschr. 1903, S. 105. Die dort angegebenen akustischen Analogien erleichtern das Verständnis ganz wesentlich.

der Wellenlänge), wird aus einem grösseren Induktorium (20 cm Funkenlänge) Elektrizität zugeführt[1]). Als veränderliche Selbstinduktion kann man den Oudinschen Resonator verwenden, der in Fig. 189 (S. 348) abgebildet ist. Der eine Pol der Funkenstrecke wird geerdet (derjenige in der Nähe des Experimentators). Die Anordnung entspricht dem Braunschen (bezw. Thomsonschen) ungekoppelten Schwingungskreis.

1) Man verändere die Selbstinduktion, indem man eine grössere oder kleinere Anzahl von Drahtwindungen in den Primärkreis schaltet. Vom oberen Ende der Spule (Fig. 189) werden lange Lichtbüschel ausgestrahlt, wenn man die richtige Stelle gefunden hat. Bläst man die Funkenstrecke an, so werden die Büschel länger. Man sieht also, dass sich am oberen Ende des Resonators, der der Luftleitung bei der Funkentelegraphie entspricht, nur dann ein kräftiger Spannungsbauch ausbildet, wenn die Wellenlänge des Primärkreises eine bestimmte Länge hat. Dieser Versuch rührt nicht von Seibt her, ist aber dem folgenden ganz analog.

2) Die Luftleitung ersetzt Seibt durch einen auf eine 2 m lange Spule gewickelten Draht (Fig. 190 S. 348). Das untere Ende des Drahtes wird also mit einer der Belegungen der Leydener Flaschen verbunden. In elektrischer Hinsicht verhält sich der aufgespulte Draht wie ein langer gerader; die Wellen bilden sich jedoch in dem Spulendrahte reiner und viel kräftiger aus. Um den Wellenverlauf (die Stellen, wo sich Spannungsbäuche bilden) sichtbar zu machen, sind parallel zur Spule sehr feine Stahldrähte gezogen. Wird auf die Grundschwingung der Spule abgestimmt (durch Veränderung der Selbstinduktion), d. h. ist die Spulenlänge $\mathfrak{l} = \frac{\lambda}{4}$, so entsteht am oberen Ende ein Spannungsbauch; dieser hat gegen die

1) Man erzielt ganz günstige Resultate, wenn man den Wehnelt-Unterbrecher benutzt und die Funkenstrecke anbläst. In das die Funkenstrecke bedeckende Gehäuse bohrt man ein Loch, in das man die Spitze eines kleinen Blasebalges schiebt. Durch das Anblasen wird die Lichtbogenbildung verhindert.

geerdeten Stahldrähte eine hohe Potentialdifferenz, und es bildet sich ein bläulichweisses Lichtband, dessen Helligkeit oben am grössten ist.

3) Wird das obere Ende der Spule geerdet[1]), so bildet sich dort ein Spannungsknoten. Vergrössert

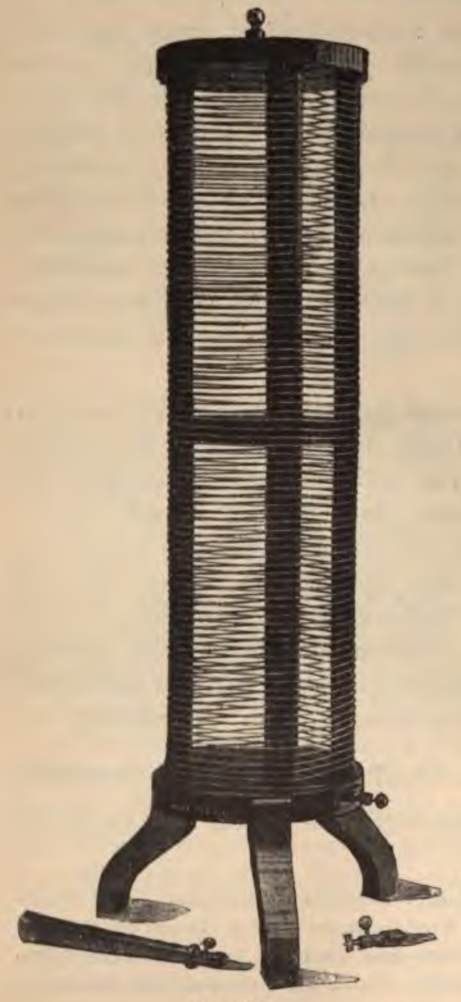


Fig. 189.



Fig. 190.

man die Selbstinduktion, so erhält man in der Mitte der Spule einen Spannungsbauch. Das Lichtband hat in der Mitte seine grösste Helligkeit.

4) Das obere Ende wird nicht geerdet; durch Veränderung der Selbstinduktion kann man es erreichen, dass sich mehrere Spannungsbäuche bilden.

5) Die grosse Spule wird durch eine kleine ersetzt und auf diese abgestimmt (starke Ausstrahlung am oberen Ende). Eine zweite der ersten kongruente Spule, die an der Spitze eine kleine Geisslersche Röhre trägt, wird in einiger Entfernung [2]) von der ersten aufgestellt; sie entspricht der Luftleitung der empfangenden Station. Die Röhre leuchtet hell auf. Ändert man die Kapazität der ausstrahlenden Spule (dadurch, dass man einen Metallkörper oben auflegt), so leuchtet die Röhre nicht.

Achtzehntes Kapitel.

Elektromagnetische Telegraphie und Telephonie.

1. Geschichte der Telegraphie [3]). Von der Mitte des 18. Jahrhunderts an waren Versuche gemacht worden, die Reibungselektrizität zum Telegraphieren zu verwenden. Nach der Entdeckung des Galvanismus benutzte Thomas von Sömmering in München (1809) die bei der Elektrolyse des

1) Die nicht geerdete Spule entspricht einer gedeckten, die geerdete einer offenen Pfeife. Wird letztere so angeblasen, dass sie ihren Grundton gibt, so bildet sich in der Mitte ein Bauch, was den Druck der Luft anbelangt.

2) Bei guter Abstimmung kann die Entfernung 3—4 m betragen.

3) Die Daten sind entnommen dem umfangreichen Werke: Telegraphie und Telephonie von Noebels, Schluckebier und Jentsch (Hdbuch der Elektrot. Bd. XII). Ferner wird im folgenden benutzt: Die Telegraphentechnik. Von Dr. Karl Strecker. 4. Aufl. 1904.

Wassers aufsteigenden Gasbläschen für eine Zeichenübertragung. Etwa 11 Jahre später machte Ampère den Vorschlag, die Ablenkung der Magnetnadel der elektrischen Telegraphie nutzbar zu machen. Das Verdienst, den ersten brauchbaren Nadeltelegraphen hergestellt und längere Zeit in grösserem Maßstabe benutzt zu haben, gebührt den deutschen Gelehrten Gauss und Weber in Göttingen. Die durch die Luft und über die Gebäude der Stadt gespannte Leitung verband das physikalische Kabinett mit der Sternwarte. Diese erste Telegraphenanlage kam im Jahre 1833 in Benutzung. Steinheil konstruierte den ersten Schreibtelegraphen und machte die höchst wichtige Entdeckung, dass die Rückleitung durch Einschaltung der Erde in den Stromkreis ersetzt werden könne, so dass also nur ein Leitungsdraht erforderlich ist. Zum Schutze der Beamten und Apparate gegen atmosphärische Entladungen verwendete Steinheil zuerst Blitzplatten, zwei durch ein dünnes Stück Seide getrennte Kupferplatten. Die Engländer Cooke und Wheatstone konstruierten zuerst einen Fünfnadel-, später einen Ein- und Zweinadeltelegraphen. Ein noch grösseres Verdienst erwarb sich Wheatstone durch die Erfindung des Relais' und des Zeigertelegraphen. Letzterer ist dadurch gekennzeichnet, dass ein Zeiger vor einem Buchstabenkreise umläuft und vor dem betreffenden Buchstaben anhält. Von den Schreibapparaten hat keiner eine so grosse Verbreitung gefunden wie der „Morse-Apparat“. Morse (Amerikaner) will den Gedanken, mit Hülfe der Elektrizität bleibende Zeichen in die Ferne zu geben, schon 1832 gefasst haben. Eine Kunde von Morses Telegraph gelangte aber erst im Herbst 1837 in die Öffentlichkeit. Im Jahre 1840 erfand Morse den unter dem Namen „Taste“ bekannten Zeichengeber. Der verbesserte Morse-Apparat gelangte im Jahre 1844 in Amerika zur Verwendung; in Deutschland fand er im Jahre 1848 Eingang.

2. **Das Morsesystem.** Das Prinzip des Morse-Apparates ist aus der Figur 191 ersichtlich. Dicht über den Schenkeln des Elektromagnets *EM* schwebt ein Anker, der an einem um die Achse *P* drehbaren Hebel *H* befestigt ist. Bei *S* trägt

der Hebel einen Stift. Fliesst durch die Windungen des Elektromagnets Strom, so wird der Anker angezogen[1]; dadurch wird der Stift gegen einen Papierstreifen gedrückt, der durch ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt wird. Sobald der Strom unterbrochen wird, verliert der Elektromagnet den grössten Teil seines Magnetismus; der Anker wird durch eine Feder F in die Höhe gezogen und der Stift von dem Papierstreifen entfernt. Je nach der Dauer des Stromschlusses entsteht auf dem Papierstreifen ein Punkt oder eine Linie. Die eingedrückten, erhabenen Zeichen nennt man **Reliefschrift**. Aus Punkten und Strichen setzte Morse das Alphabet zusammen (Morseschrift), z. B.

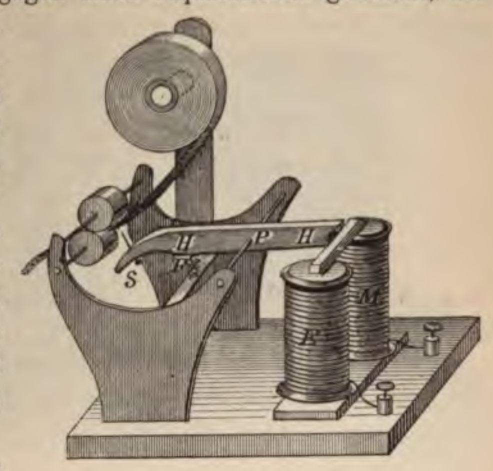


Fig. 191.

a = •—, e = •, c = ••, n = —•, m = ——.

Die Reliefschrift hat verschiedene Nachteile; vor allem ist zu ihrer Erzeugung eine grosse Kraft nötig, d. h. man muss starke Batterien verwenden, um den erforderlichen Strom (60—100 Milliampere) zu erzeugen. Eine wesentliche Verbesserung erfuhr der Morse-Apparat durch Einführung einer Vorrichtung, die farbige Schrift liefert.

Der **deutsche Normal-Farbschreiber** der deutschen Reichs-Telegraphenverwaltung besteht aus dem mechanischen Teile zur Fortbewegung des Papierstreifens mit Laufwerk, Papierführung (s. Fig. 192 S. 352) und Farbekasten und aus dem

1) Um zu verhindern, dass der Anker durch den remanenten Magnetismus festgehalten wird (dass er „klebt“), richtet man es so ein, dass eine direkte Berührung zwischen Anker und Elektromagnet nicht stattfinden kann, man begrenzt den Ankerhub durch einen Anschlag.

elektromagnetischen Teile mit Elektromagnet, Anker und Schreibhebel. Die Federtrommel *T* umschliesst die Triebfeder, eine 3,3 m lange und 34 mm breite stählerne Blattfeder; diese

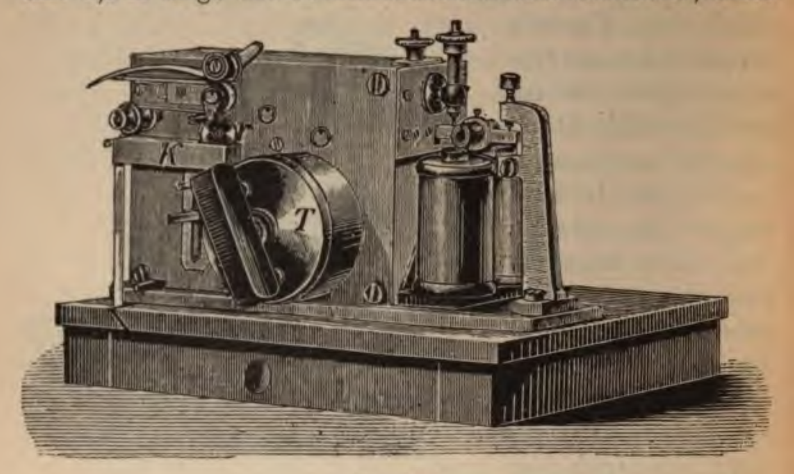


Fig. 192.

wird aufgezogen und durch eine Sperrvorrichtung arretiert, wenn der Apparat nicht benutzt wird. Die Schreibvorrichtung besteht aus dem Farbekasten *K* und dem (durch den mechanischen Teil in Rotation versetzten) Schreibrädchen *r*, dessen unterer Teil in die Farbe eintaucht. Das Rädchen *r* wird durch den Schreibhebel (grösstenteils im Innern des Gehäuses) gehoben und gesenkt; bei der Aufwärtsbewegung schlägt es gegen den sich bewegenden Papierstreifen und bringt auf diesem farbige Zeichen hervor. An dem andern Ende des Schreibhebels befindet sich der Anker; seine Bewegung wird durch zwei Anschläge begrenzt. Er besteht aus einem hohlen, an beiden Enden abgeschrägten, der Länge nach aufgeschlitzten Cylinder aus weichem Eisen.

Der Schreibhebel ist so eingerichtet, dass man auf Arbeitsstrom- und auf Ruhestrombetrieb einstellen kann. Die als Arbeitsstrom bezeichnete Betriebsweise besteht darin, dass die telegraphischen Zeichen im Amte II durch Stromsendung (Stromschluss) vom Amte I aus erzeugt werden. Bei Ruhestrom ist die Betriebsbatterie auf die Ämter I und II verteilt, und das Telegraphieren geschieht durch Unterbrechen des Stromkreises.

Die deutsche Morsetaste. Um den Stromkreis auf dem gebenden Amte schnell öffnen und schliessen zu können, bedient man sich der Taste, auch Schlüssel genannt. Auf dem Grundbrette (s. Fig. 193) sind drei Schienen befestigt, die je eine

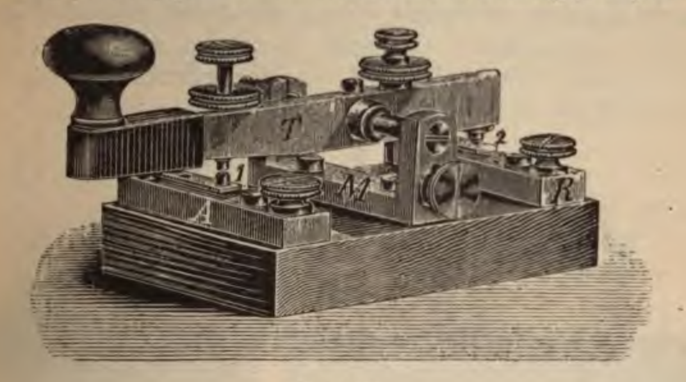


Fig. 193.

Klemmschraube zur Befestigung eines Leitungsdrahtes tragen. Die Schiene *R* heisst Ruheschiene, *M* ist die Mittelschiene und *A* die Arbeits- oder Telegraphierschiene. An dem Tastenhebel *T* befinden sich zwei Kontaktstifte; die beiden Kontakte bei 1 bilden den Arbeitskontakt, diejenigen bei 2 den Ruhekontakt. Eine regulierbare Spiralfeder (zwischen *M* und *R*, grösstenteils in der Grundplatte verborgen) dient dazu, durch Herabziehen des hinteren Teiles des Tastenhebels einen festen Schluss des Ruhekontaktes zu bewirken.

Schaltung. An die Mittelschiene wird stets die Fernleitung befestigt (s. Fig. 194 S. 354), an die Ruheschienenklemme stets das eine Ende der Elektromagnetwickelung des Morse-Apparates (in Fig. 194 mit *M* bezeichnet). Bei Arbeitsstrombetrieb, auf den sich unsere Figur bezieht, wird die Arbeitsschiene mit dem einen Pole der Batterie verbunden, der andere Pol wird an Erde gelegt, ebenso das zweite Ende der Elektromagnetwickelung. Auf dem Amte I hat der Telegraphist „Taste gedrückt". Verfolgt man den Strom an der Hand der nummerierten Pfeile, so erkennt man, dass der Strom des gebenden Amtes durch den Schreibapparat des empfangenden

Amtes geht. Der Strom fliesst durch die Erde zurück zur Batterie; der Apparat des gebenden Amtes spricht nicht an.

Bei Ruhestrombetrieb bleibt die Arbeitsschienenklemme (*A* in Fig. 193, S. 353) unbenutzt. Beim Telegraphieren verschwindet der in der Leitung vorhandene Strom; die Anker sämtlicher in die

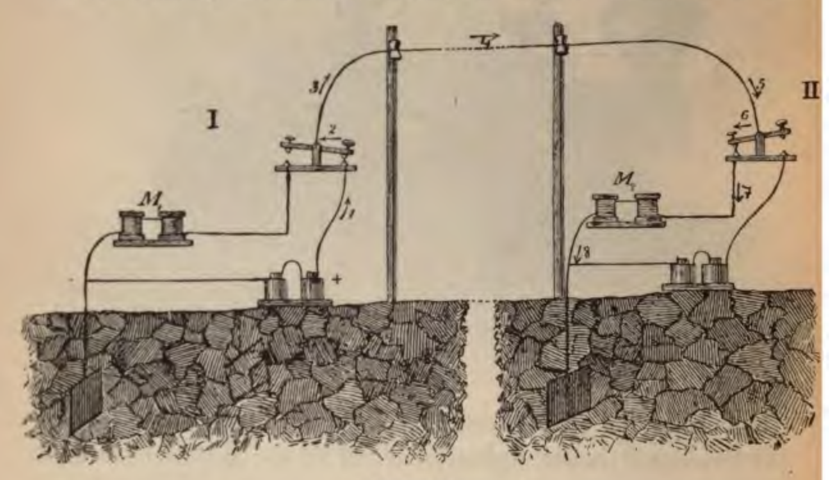


Fig. 194.

Leitung eingeschalteter Schreibapparate fallen ab, die Schreibrädchen werden gehoben. Der Arbeitskontakt hat nur die Aufgabe, die Bewegung des Hebels zu begrenzen. Eine Batterie genügt für beide Ämter.

Das Relais. Der auf dem empfangenden Amte ankommende Strom muss eine gewisse Stärke haben, wenn der Schreibapparat richtig funktionieren soll. Bei sehr langen Telegraphenleitungen wird aber der Strom stark geschwächt, hauptsächlich durch den mit der Länge der Leitung wachsenden Ohmschen Widerstand, ferner durch die Abteilungen zur Erde[1]). Man schaltet daher an Stelle des Schreibapparates einen Apparat ein, der nur eine sehr geringe Arbeit zu leisten hat, das Relais. Es besteht aus einem besonders empfindlich konstruierten Elektromagnet und einem leicht drehbaren Anker.

1) Infolge unvollkommener Isolation fliesst an jedem Maste eine sehr geringe Elektrizitätsmenge zur Erde. Der ankommende Strom ist daher schwächer als der abgehende.

Das Relais hat den Zweck, durch Bewegung seines Ankers einen zweiten Stromkreis, den Ortsstromkreis, zu schliessen; durch den letzteren wird der Schreibapparat betätigt.

Es befinden sich also auf jedem Amte zwei Batterien, die Linienbatterie und die Ortsbatterie. Der Strom der ersteren durchfliesst die Telegraphenleitung, gelangt zur Empfangsstation und geht durch das Relais. Ein solches ist in Figur 195 schematisch gezeichnet, in der der besseren Übersicht halber angenommen ist,

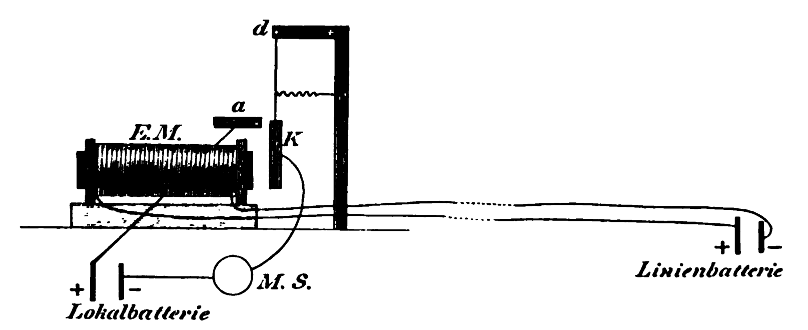


Fig. 195.

dass die Ämter durch eine Doppelleitung miteinander verbunden sind. Durchfliesst der ankommende Strom die Windungen des Relais-Elektromagnets *E.M.*, so zieht dieser den Anker *K* an. Hierdurch wird der Strom der Lokalbatterie geschlossen, und der Schreibapparat *M.S.* spricht an.

Das Relais findet auch Verwendung bei der sogenannten Übertragungsstation. Bei sehr grosser Entfernung zwischen den beiden Ämtern wurden früher die Telegramme auf einer Zwischenstation aufgenommen und durch einen Beamten weiter befördert. Man lässt statt dessen jetzt den auf der Zwischenstation ankommenden Strom durch die Rollen eines Elektromagnets gehen, der durch Anziehung eines Ankers eine Batterie schliesst, die dann ihren Strom durch den zweiten Teil der Leitung schickt.

3. **Das Klopfersystem**[1]. Beim Klopferbetrieb werden die Telegramme nach dem Gehör aufgenommen. Durch den ankommenden bezw. durch den Strom der Ortsbatterie wird ein Elektromagnet erregt, der einen Anker anzieht. Dieser ist an einem Hebel befestigt, der durch eine Abreissfeder nach

1) Der Klopfer gehört zu den Sprechtelegraphen.

Stromunterbrechung in die Ruhelage zurückgezogen wird. Die Bewegung des Hebels wird durch zwei Anschlagschrauben begrenzt. Das Anschlagen bei Stromschluss und Stromunterbrechung wird von dem Beamten gehört. Einer kurzen Pause zwischen dem ersten und zweiten Schalle entspricht ein Punkt des Morsealphabets, einer längeren Pause ein Strich.

Zur Lautverstärkung wird der Klopfer in einer Schallkammer aufgestellt, einer kleinen Kammer mit gewölbter Rückenwand, deren offene Seite dem Beamten zugewendet ist.

Für den Klopferbetrieb bedient man sich einer besonderen Taste, von deren Beschreibung aber abgesehen werden soll.

Das Klopfersystem findet ausgedehnte Verwendung; es hat vor dem Morsesystem den Vorzug, dass es eine grössere Sprechgeschwindigkeit ermöglicht (ca. 600 Wörter stündlich gegen 400); auch die Sicherheit der Übermittelung wird wesentlich gefördert.

4. **Drucktelegraphen.** Von diesen soll nur der Hughes-Apparat besprochen werden. Dieser gibt die Telegramme auf dem Papierstreifen in gewöhnlicher Druckschrift wieder (Typendrucker). Er dient sowohl als Geber wie als Empfänger (nicht gleichzeitig). Es soll nur das Prinzip des Apparates beschrieben werden. Ein Stahlrad trägt auf seinem Umfange die Typen für die Buchstaben des Alphabets, die Ziffern etc., im ganzen 52 Zeichen. Dieses Rad, das Typenrad, wird durch ein Räderwerk in gleichförmige Drehung versetzt. Das Typenrad auf der gebenden und dasjenige auf der empfangenden Station stimmen in ihrem Umlaufe genau überein, d. h. jedes Rad gebraucht für eine Umdrehung dieselbe Zeit, und bei beiden ist in jedem Momente dieselbe Type an der tiefsten Stelle des Umfanges (Druckstellung). Wenn die genannten Bedingungen erfüllt sind, so sagt man, die beiden Räder laufen synchron. Die Drehung des Typenrades wird durch ein Laufwerk bewerkstelligt, das durch ein Gewicht oder durch einen kleinen Elektromotor angetrieben wird. Die Geschwindigkeit wird durch eine besondere Vorrichtung reguliert, die im wesentlichen aus einer Bremsvorrichtung und einem Pendel besteht.

Der durch die Leitung geschickte Strom hat die Aufgabe, einen Papierstreifen im richtigen Momente dem Typenrade des

empfangenden Amtes zu nähern und ihn gegen die Type zu drücken. Dieses muss in dem Momente geschehen, in dem der Buchstabe, der telegraphiert werden soll, auf dem gebenden Amte die Druckstellung erreicht hat. Wegen des Synchronismus ist dann auf dem empfangenden Amte in demselben Momente derselbe Buchstabe in Druckstellung.

Gegen den Rand des Typenrades wird das mit Filzüberzug versehene Farbenrad leicht gedrückt, so dass beim Umgange des Typenrades auch das Farbenrad gedreht wird und die Typen stets mit Farbe benetzt werden.

Zur Entsendung der Telegraphierströme dient ein Tastenwerk, ähnlich demjenigen eines Klaviers. Es besteht aus 28 Tasten, die in zwei Reihen übereinander angeordnet sind. Auf jeder Taste steht ein Buchstabe und eine Ziffer oder ein Satzzeichen. Drückt man auf eine Taste, z. B. auf diejenige, die dem Buchstaben a entspricht, so wird in dem Momente Strom in die Leitung geschickt, in dem a auf dem Typenrade des gebenden Amtes in die Druckstellung eingerückt ist.

Wir müssen uns noch klar machen, wie man mittels der 28 Tasten 52 Zeichen geben kann.

Auf dem Umfange des Typenrades befinden sich 2 × 28 Felder oder 28 Doppelfelder. Die Typen sind so geordnet, dass die Buchstaben mit den Ziffern und Unterscheidungszeichen (Interpunktionen, Klammern etc.) abwechseln; auf die Ziffer 1 folgt der Buchstabe A, auf 2 der Buchstabe B etc., 1 und A füllen ein Doppelfeld aus. Durch die Typen werden 52 Felder ausgefüllt; es bleiben also 2 Doppelfelder frei. Das Typenrad kann nun durch eine besondere Vorrichtung so verschoben werden, dass entweder die erste oder die zweite Hälfte jedes Doppelfeldes sich in Druckstellung befindet, dass also entweder Ziffern oder Buchstaben gedruckt werden.

Von den 28 Tasten entsprechen zwei den leeren Doppelfeldern; die erste freie Taste (das Ziffernweis) dient dazu, das Typenrad, nachdem es für Buchstaben in Druckstellung war, zum Druck der Zahlen etc. umzustellen. Durch Druck auf die zweite leere Taste (das Buchstabenweis) wird das Typenrad so verschoben, dass die Buchstaben in Druckstellung kommen. Wird das Typenrad durch Niederdrücken des Buchstabenweis zum Drucken der Buchstaben umgestellt, und drückt man dann später auf dieselbe leere Taste, so entsteht der Zwischenraum zwischen zwei Wörtern.

Die „Sprechgeschwindigkeit“ bei einfachem Betriebe wird zu 1200 Wörtern pro Stunde angegeben.

5. **Die Mehrfachtelegraphie** auch Multiplextelegraphie genannt. Bei dem eben beschriebenen einfachen Betriebe kann ein Amt, falls nur eine Leitung vorhanden ist, nicht gleichzeitig geben und empfangen. Die Leitung wird dann nicht in dem Maße ausgenutzt, wie es theoretisch möglich ist; denn zwischen je zwei Zeichen liegt eine verhältnismässig lange Pause. Um den Verkehr zwischen den grossen Städten bewältigen zu können, war man genötigt, mehrere Leitungen zu legen und das Personal zu vermehren.

Berücksichtigt man, dass 1 km einer Telegraphenleitung, die für den grossen Verkehr bestimmt ist, 80—100 Mark kostet, und dass für die Unterhaltung jährlich etwa 10 % der Herstellungskosten aufzuwenden sind, so erkennt man, dass die Telegraphenverwaltung selbst bei den Hauptlinien keinen Gewinn erzielen konnte.

Ein Mittel, eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Leitungen zu ermöglichen, besteht in der Anwendung der Mehrfachtelegraphie. Die einfachste Methode derselben ist das Gegensprechen oder die Duplextelegraphie. Sie besteht darin, dass auf jeder der beiden Stationen A und B gleichzeitig ein Telegramm aufgegeben wird. Der Beamte in A braucht also nicht zu warten, bis der Beamte in B sein Telegramm beendet hat. Die Schaltung wird vielmehr so eingerichtet, dass der Geber und Empfänger in A und gleichzeitig der Geber und Empfänger in B arbeiten können.

Ist die Schaltung so eingerichtet, dass von A nach B gleichzeitig zwei Telegramme gesandt werden können, so nennt man das Verfahren Doppelsprechen[1]) (Duplexbetrieb). Können gleichzeitig zwei Telegramme von A nach B und zwei von B nach A befördert werden, so hat man Doppelgegensprechen (Quadruplex).

Bei den bis jetzt genannten Verfahren werden Schaltungen benutzt, bei denen die Telegraphierströme der verschiedenen Telegramme gleichzeitig in die Leitung gelangen — gleichzeitige Mehrfachtelegraphie. Bei der Vielfach- oder Multiplextelegraphie aber besteht das am meisten

1) Doppelsprechen für sich allein wird nicht benutzt.

gebrauchte Verfahren darin, dass die Leitung in raschem Wechsel zur Verbindung je eines von mehreren Paaren zusammenarbeitender Apparate benutzt wird, so dass in jedem Momente nur der Strom eines einzigen Gebers in der Leitung fliesst — wechselzeitige Mehrfachtelegraphie.

a) Gleichzeitige Mehrfachtelegraphie. Der Empfangsapparat des eigenen Amtes darf durch den abgehenden Strom nicht beeinflusst werden, obgleich er stets im Stromwege liegen muss. Man erreicht dies nach zwei verschiedenen Methoden. Bei der Differentialschaltung hat der Elektromagnet des Empfangsapparates zwei gleiche Wickelungen. Der ankommende Strom durchfliesst beide Wickelungen (hauptsächlich eine derselben) in gleichem Sinne, der abgehende Strom beide zu gleichen Teilen (Stromverzweigung) in entgegengesetztem Sinne; die beiden Teile des abgehenden Stromes heben sich daher in ihrer magnetisierenden Wirkung auf. Die andere Methode wird als Brückenschaltung bezeichnet. Man stellt auf jedem Amte eine Schaltung nach der Wheatstoneschen Brücke her und legt den Empfänger in eine Diagonale; die Widerstände werden so abgeglichen, dass der abgehende Strom nicht durch die Diagonale fliesst, also den eigenen Empfangsapparat nicht betätigt, wohl aber der ankommende Strom.

Das Gegensprechen wird in der Reichstelegraphie in ober- und unterirdischen Linien mit dem Hughes-Apparat betrieben.

b) Wechselzeitige Mehrfachtelegraphie. „Der Vorgang des Telegraphierens lässt sich in mehrere Teile zerlegen, in die mechanischen Bewegungen des Gebers und des Empfängers und die eigentliche Stromsendung. Die letztere lässt sich auf einen kurzen Augenblick beschränken, während die ersteren einen verhältnismässig längeren Zeitraum in Anspruch nehmen. Statt nun während dieser Vorbereitungszeit die Leitung unbenutzt zu lassen, kann man sie inzwischen benutzen, um die Stromsendungen anderer Apparate zu befördern, die ihre Vorbereitung zur Stromsendung beendet haben“ (Strecker, l. c. S. 292). In sehr vollkommener Weise ist das Problem der wechselzeitigen Mehrfachtelegraphie von dem Franzosen Baudot und dem Amerikaner Rowland gelöst worden. Bei dem System Rowland können vier Telegramme gleichzeitig in einer Richtung befördert werden. Da die Apparate in Gegensprechschaltung verbunden sind, so können in umgekehrter Richtung ebenfalls vier Telegramme gesendet werden (achtfacher Typendrucktelegraph).

6. **Telegraphieren auf langen Seekabeln.** Kürzere Seekabel können ebenso betrieben werden wie Landkabel von

gleicher Länge. Hat das Seekabel eine grosse Länge, so spielt die Kapazität eine wichtige Rolle [1]. Wird das Kabel mit der Batterie verbunden, so strömt zunächst ein Ladungsstrom ein, der Strom am gebenden Ende hat im Momente des Stromschlusses eine ganz bedeutende Stärke. Von diesem Ladungsstrome kommt zunächst nur sehr wenig am empfangenden Ende an, die ganze Elektrizität, die die Batterie in der ersten Zeit abgibt, bleibt in dem Kabel aufgespeichert. Nur langsam, in dem Maße, in dem sich die Leitung lädt, steigt der Strom an dem empfangenden Ende. Bei Stromunterbrechung entlädt sich das Kabel; es ist noch eine Zeitlang Strom vorhanden. Um die Telegraphiergeschwindigkeit zu erhöhen, benutzt man eine besondere Betriebsweise und sehr empfindliche Apparate. „Man wählt die Empfangsapparate nicht so, dass sie auf bestimmte Werte der Stromstärke ansprechen, sondern benutzt das Zu- und Abnehmen und den Richtungswechsel des Stromes, ohne auf seine Stärke zu achten“ (Strecker, S. 177). Man muss also einen besonderen Geber, zur Erzeugung von Strömen wechselnder Richtung geeignet, anwenden. Dieser, die Doppeltaste, ist so eingerichtet, dass man nach Belieben den positiven oder negativen Pol der Batterie mit dem Kabel verbinden kann. Als Empfangsapparat verwendet man Spiegelgalvanometer (Sprechgalvanometer) oder den Heberschreiber von William Thomson. Dieser erzeugt die telegraphische Schrift in Form einer Zickzacklinie auf einem bewegten Papierstreifen. Seine Wirkungsweise beruht auf der Ablenkung eines mit vielen Windungen versehenen Rahmens, eines Multiplikatorrahmens, in einem magnetischen Felde, wenn durch den Rahmen ein Strom fliesst (siehe Drehspuleninstrumente). Die Spule wird je nach der Stromrichtung nach rechts oder nach links abgelenkt. Ihre Bewegungen werden auf den Heber übertragen, ein zweimal rechtwinklig gebogenes, sehr dünnes Röhrchen. Der eine (kürzere) Schenkel taucht in ein Gefäss mit Farbe

---

1) Man kann die Leitung als die eine Belegung, den schützenden Metallmantel als die andere Belegung eines cylindrischen Kondensators ansehen.

ein, die an dem anderen Ende ausfliesst. Dieses hängt dicht vor einem Papierstreifen, der sich langsam bewegt. Die hin- und hergehenden Bewegungen des Hebers zeichnen sich demnach als Zickzacklinie auf das Papier.

Man verwendet bei der Kabeltelegraphie eine etwas modifizierte Brücken-Gegensprechschaltung (Harwoodsche Schaltung).

7. **Das Telephon.** Dem Naturforscher und Lehrer der Physik Phil. Reis gebührt das Verdienst, i. J. 1861 einen von ihm „Telephon“ genannten Apparat konstruiert zu haben, der mit Hülfe der Elektrizität Töne und Sprechlaute und selbst einzelne gesprochene Worte nach einer entfernten Station übertrug. Obschon der von Reis konstruierte Apparat nicht die Bedingungen eines brauchbaren Sprechinstrumentes erfüllte, und erst durch Bell in Boston 1876 in einer für den Zweck geeigneten Weise vervollkommnet wurde, so kann doch nur Ph. Reis als der Erfinder des Telephons bezeichnet werden.

In Fig. 196 sei NS ein Magnetstab, PP' eine am Rande festgeklemmte, sehr dünne Eisenplatte (Membran). Von N gehen Kraftlinien aus, die grösstenteils in das Eisen eindringen. Übt man gegen die Mitte von PP' einen Druck von links nach rechts aus, so wird der Abstand zwischen N und PP' kleiner, der magnetische Widerstand verringert sich (s. S. 102), und es wächst die Zahl der in die Membran dringenden Kraftlinien; bewegt sich PP' zurück, so nimmt die Kraftlinienzahl ab. Schiebt man also über den Nordpol N eine Drahtspule, so wird in dieser jedesmal eine elektromotorische Kraft induziert, wenn sich die Membran dem Pole N nähert bezw. sich von ihm entfernt, und zwar ist die elektromotorische Kraft, die bei der Annäherung entsteht, entgegengesetzt gerichtet derjenigen, die bei der Entfernung erzeugt wird. Führt die Membran Schwingungen aus, so werden in der Spule Wechselströme induziert, deren Periodenzahl gleich ist der Schwingungszahl.

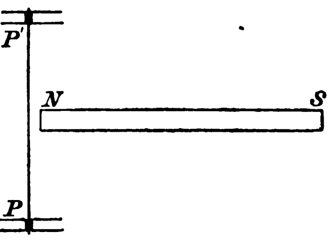


Fig. 196.

Beim Sprechen, Singen etc. wird die Luft in Schwingungen versetzt, es entstehen abwechselnd an einer bestimmten Stelle des Raumes Verdichtungen und Verdünnungen der Luft; da die Luft elastisch und sehr leicht beweglich ist, so pflanzen sich die Schallwellen auf grössere Entfernungen hin fort. Spricht man nun gegen die Membran oder in deren Nähe, so übt jede ankommende Verdichtung einen Stoss aus, und die Membran bewegt sich im Zeitmaß der ankommenden Schallwellen nach P hin und wieder zurück [1]).

Es seien in Figur 197 NS und $N_1 S_1$ zwei Magnetstäbe, denen eingeklemmte Eisenmembranen gegenüberstehen. Ein langer, isolierter Draht werde auf die Magnetstäbe in der an-

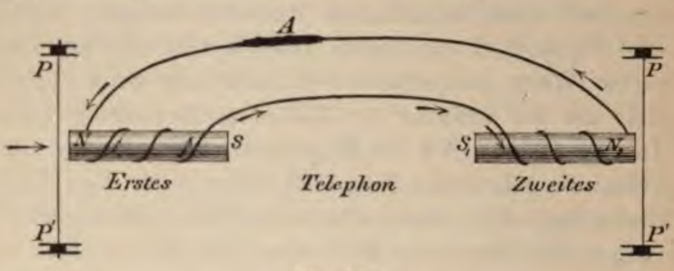


Fig. 197.

gedeuteten Weise gewickelt, die Enden seien bei A miteinander verbunden. Übt man gegen die erste Membran einen Stoss aus, so wird in den Windungen auf NS eine elektromotorische Kraft induziert, die einen Strom im Sinne der Pfeile erzeugt. Dieser wirkt auf den Magnetismus von $N_1 S_1$ verstärkend, so dass die Membran rechts stärker angezogen wird, sie biegt sich durch. Entfernt sich jetzt die linke Membran von N, so wird ein neuer Strom induziert, der im entgegengesetzten Sinne zirkuliert wie der vorige. Da dieser den Magnetismus von $N_1 S_1$ schwächt, so entfernt sich die rechte Membran vom Nordpole. Macht also die Membran links Schwingungen, so tut dies auch die Membran rechts. Durch die

1) Die Schwingungsweite der Membran (aus Weissblech, verzinntem Eisenblech) ist fast mikroskopisch klein, denn sie geht nach den angestellten Versuchen nicht über einige Hundertstel Millimeter hinaus.

Bewegungen der zweiten Membran wird die Luft der Umgebung in Schwingungszustand versetzt, ein in der Nähe befindliches Ohr nimmt einen Schall, einen Ton oder ein Geräusch wahr.

Ein Telephon nach Bell stellt Figur 198 im Längsschnitte dar. In dem Gehäuse G erblickt man den Magnetstab NS, dessen oberes Ende sich im Innern einer Drahtspule aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes befindet. Die Enden der Drahtrolle sind mit den Klemmschrauben K_1, K_2 verbunden. Dadurch, dass der Deckel auf das Gehäuse fest aufgeschraubt ist, wird die dünne Eisenplatte PP' am Rande festgeklemmt. Der Deckel D hat eine trichterförmige Vertiefung M, das Mundstück.

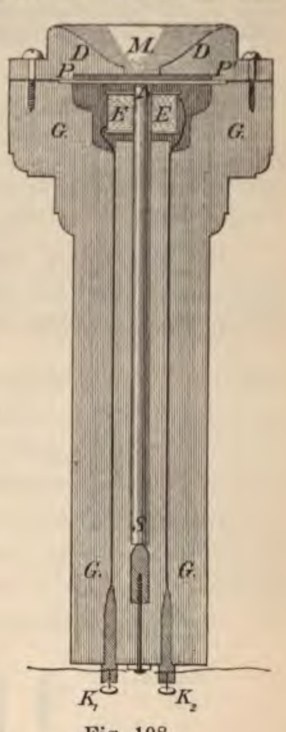


Fig. 198.

Fernsprecher mit Stabmagnet werden in der Praxis kaum noch benutzt. Hauptsächlich sind folgende Formen im Gebrauch: 1) Fernsprecher gerader Form mit Hufeisenmagnet und aufgesetzten Polschuhen aus weichem Eisen; jeder Polschuh wird von einer Rolle aus feinem Drahte umgeben. 2) Fernsprecher mit seitlicher Schallöffnung; die Polschuhe stehen senkrecht zu dem Hufeisenmagnet. 3) Der Fernsprecher mit Ringmagnet enthält an Stelle des schweren Hufeisenmagnets ein System aus zwei halbringförmigen Scheibenmagneten, deren gleichnamige Pole einander zugewendet sind; die beiden Teile werden durch die Unterlegeplatte der Polschuhe verbunden. Die Polschuhe haben eine elliptische Form und sind, um die Entstehung von Wirbelströmen tunlichst zu vermeiden, in vier Teile gespalten.

8. **Das Mikrophon.** Bei grösserer Entfernung kann das Telephon allein zum Sprechen nicht mehr benutzt werden, weil die induzierten Ströme in den langen Verbindungsdrähten zu sehr geschwächt werden. Man muss dann das Mikrophon zu Hülfe nehmen; dieses überträgt die Schallwellen kräftiger und deutlicher.

Um das Prinzip des Mikrophons, das von Hughes i. J. 1878 erfunden wurde, klar zu legen, kann man die in Fig. 199 (S. 364) dargestellte Versuchsanordnung wählen: auf einem Resonanzkasten A

liegen zwei Kohlenstäbchen, diese werden durch ein aufgelegtes drittes Stäbchen s_3 überbrückt. Verbindet man die Pole eines Elementes mit s_1 und s_2 und schaltet in den Schliessungsbogen ein Galvanoskop G ein, so wird die Nadel abgelenkt. Berührt man A, so bewegt sich die Nadel. Infolge der Berührung, der Erschütterung, gerät der Resonanzboden in Schwingungen, infolgedessen wird der Kontakt zwischen s_3 und den beiden anderen Stäbchen bald inniger, bald lockerer (Widerstandsänderungen an der Berührungsstelle).

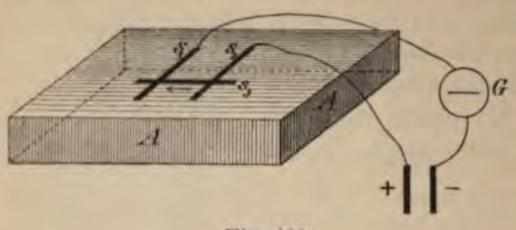


Fig. 199.

Das Mikrophon besteht in der ihm zuerst von Hughes gegebenen Form, aus einem Resonanzkästchen (*R* in Fig. 200) mit angeleimter senkrechter Holzwand und drei Kohlenstücken.

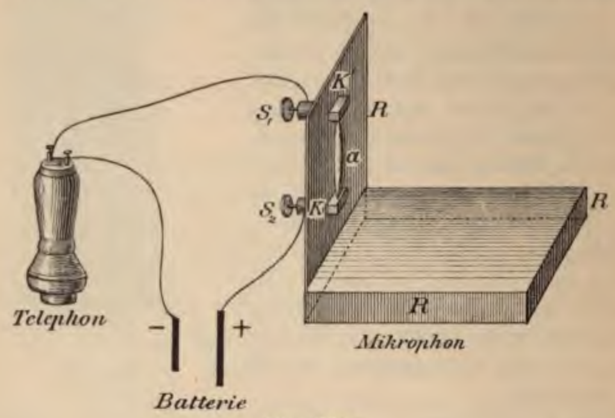


Fig. 200.

K und *K'* haben je eine kleine Vertiefung, in die das Kohlenstäbchen *a* eingreift, so dass lose Kontakte entstehen. Spricht man gegen das Resonanzkästchen, so ändert sich der Widerstand an den Kontakten periodisch, daher auch die Stromstärke, und die gesprochenen Worte sind im Telephon deutlich wahrnehmbar.

Der wichtigste Teil des Mikrophons ist demnach der Kohlenkontakt, dessen Übergangswiderstand sich genau mit den Schwingungen der Sprechplatte ändern muss. Es genügt schon ein einziger Kontakt, wie ihn die früher viel benutzten Mikrophone von Berliner (Kohlenscheibe mit aufliegendem Hammer) und Blake (Platinkügelchen und Kohlenscheibe, an je einer Blattfeder sitzend) aufweisen. Der eine Kontaktkörper sitzt entweder unmittelbar an der Rückseite der Sprechplatte oder wird leicht gegen diese gepresst. Die Sprechplatte kann aus Metall (Eisen, Messing, Aluminium), Holz, Glimmer etc. bestehen. Das Bestreben, die Zahl der Kontakte zu vermehren, führte zur Konstruktion der Körnermikrophone; sie geben eine kräftigere und gleichmässigere Lautwirkung. Der Zwischenraum zwischen zwei parallelen Kohlenplatten wird mit Kohlenkörnern ausgefüllt; die vordere Platte dient entweder selbst als Sprechplatte oder ist auf der Rückseite einer Metallmembran befestigt.

9. Nebenapparate für den Fernsprechbetrieb. a) Nur bei kleinen Anlagen (Haustelephonie, Anlagen in Fabriken etc.) wird der Mikrophonstrom direkt in die Fernleitung geschickt; meistens erfolgt eine Transformation desselben. Hierzu dient die Induktionsrolle, auch Fernsprechübertrager genannt. Diese besteht aus einem Bündel dünner, durch Lacküberzug gegeneinander isolierter Eisendrähte, einer primären Spule aus einem dickeren Draht mit einer geringen Zahl Windungen und

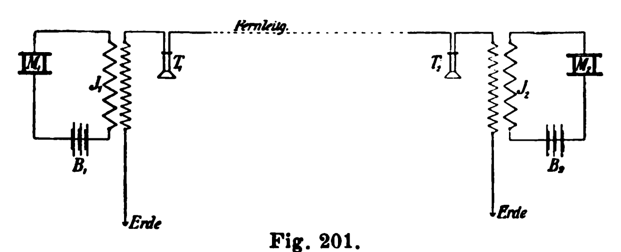


Fig. 201.

aus einer sekundären Spule aus einem dünneren Draht mit vielen Windungen.

Die Schaltung ergibt sich aus Figur 201; in dieser ist *M* das Mikrophon, *B* die Mikrophonbatterie, *J* die Induktions-

rolle, T das Telephon. M, B und die primäre Spule der Induktionsrolle bilden den Ortsstromkreis. Die induzierten Ströme haben eine viel höhere Spannung als die Batterie und vermögen infolgedessen sehr viel besser grosse Leitungswiderstände zu überwinden.

b) Anrufvorrichtungen. Zum Anruf des Amtes und anderer Stellen wurden früher vielfach Batterieströme benutzt, durch die ein Wecker (eine elektrische Klingel) in Betrieb gesetzt wurde; jeder Abonnent erhielt, entsprechend der Länge der Anschlussleitung, eine aus 6—12 Leclanché- oder Trockenelementen bestehende Batterie, die Weckbatterie. Jetzt werden in neuen Stadt-Fernsprechnetzen zum Anruf allgemein kleine magnetelektrische Maschinen, Kurbelinduktoren, benutzt. In Fig. 202 ist ein zweilamelliger Kurbelinduktor abgebildet[1]. Die gleichnamigen Pole der beiden Hufeisenmagnete M_1 und M_2 werden durch zwei Polschuhe aus weichem Eisen miteinander verbunden. Diese sind der Länge nach cylindrisch ausgedreht. Der aus weichem Eisen angefertigte Anker von I-förmigem Querschnitt passt in den Hohlraum der Polschuhe mit geringem Spielraum hinein. Die beiden rinnenartigen Ausschnitte sind mit dünnem, isoliertem Kupferdrahte bewickelt.



Fig. 202.

Die Ankerwickelung wird durch einen Wachstuchüberzug gegen Beschädigung geschützt. Das eine Ende der Ankerwickelung ist direkt am Anker festgeschraubt, steht also über den Ankerzapfen mit dem Lager und der Klemme K in Verbindung; das andere Ende ist durch ein Schräubchen an einem Dorn befestigt, der in den Ankerzapfen eingesetzt, von diesem aber

1) In Stadt-Fernsprechnetzen wird meistens der dreilamellige Induktor benutzt, dessen magnetisches Feld von drei Hufeisenmagneten erzeugt wird.

durch eine Hartgummihülse isoliert ist. Auf dem Dorn schleift eine Blattfeder. Verbindet man den Körper des Induktors (Klemme *K* in der Figur) mit der Leitung und die Blattfeder mit der Erde oder mit dem zweiten Zweige der Doppelleitung (zu der man in grossen Städten übergeht), so ist die Ankerwickelung eingeschaltet, und man kann durch Drehen des Ankers Wechselströme in die Leitung senden. Die Antriebsvorrichtung besteht aus einer Kurbel und Zahnradübersetzung.

Damit die Ankerwindungen nur so lange in die Leitung eingeschaltet sind, als Weckstrom erzeugt werden soll, wird die Anordnung so getroffen, dass die Wickelung bei stillstehender Kurbel aus der Leitung ganz ausgeschaltet oder kurz geschlossen ist [1]).

Der in dem Kurbelinduktor induzierte Strom gelangt in den Wecker. Der Wechselstromwecker mit zwei Glocken besteht aus einem Hufeisenmagnet, auf dessen unterem Schenkel, dem Südpol *S* (Fig. 203), durch eine Eisenplatte miteinander verbunden, zwei kleine Eisenkerne stehen. Zwischen den Polflächen des Elektromagnets und dem darüber befindlichen Nordpol spielt der Anker *A*, der so gelagert ist, dass er sich nach beiden Seiten drehen kann. Rechtwinklig zu seiner Drehungsachse trägt der Anker an einem langen Stahldraht den Klöppel. Die beiden freien Pole *s* des Elektromagnets sind gleichnamig und (wenn kein Strom vorhanden) gleich stark; jeder zieht also

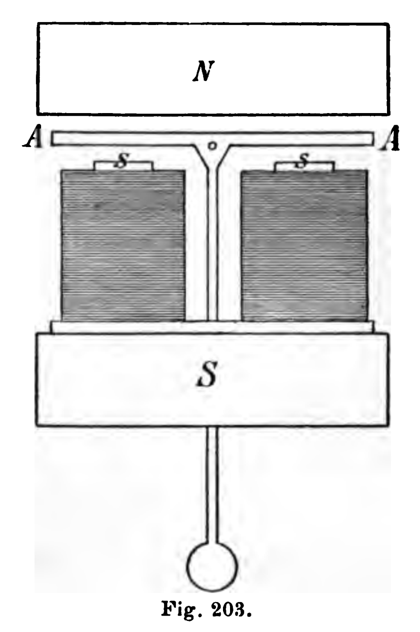


Fig. 203.

1) Die Klemmenspannung des Induktors beträgt bei 3 Umdrehungen der Kurbel in 1 Sekunde etwa 30 Volt.

das gegenüberliegende Ende des Ankers *A* gleich stark an. Nun ist die Bewickelung des Elektromagnets so geführt, dass ein Strom, der den Magnetismus des einen Kernes verstärkt, den des anderen schwächt. Man sieht leicht ein, dass bei Zufuhr von Wechselstrom der Anker Schwingungen ausführt.

c) Der Hakenumschalter (Fig. 204) dient dazu, abwechselnd den Wecker oder das Mikrophon und den Fernhörer mit der Leitung zu verbinden. Hängt der Fernhörer an dem Haken, so zieht er den Hebel abwärts, wodurch die Leitung mit dem Wecker verbunden wird; wird der Fernsprecher abgehoben, so drückt eine Feder den Hebel in die Höhe, und es werden die Sprech- und Hörapparate eingeschaltet.

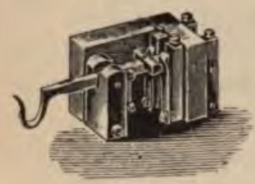


Fig. 204.

10. **Der sprechende Lichtbogen, Lichttelephonie.** Wie wir früher gesehen haben, gibt ein Lichtbogen jede Stromschwankung akustisch wieder (s. S. 306). Man hat diese Eigenschaft (einstweilen mehr im Laboratorium als in der Praxis) benutzt, die menschliche Sprache und musikalische Töne vom Lichtbogen reproduzieren zu lassen. Als Stromquelle benutzt man eine Akkumulatorenbatterie (s. Fig. 205) und schaltet in den Stromkreis die primäre Spule einer Induktionsrolle[1]). Die sekundäre Spule bildet mit einem Mikrophon *M* und einer kleinen Batterie einen besonderen Stromkreis. Singt oder pfeift man gegen die Membran des Mikrophons, so ändert sich die Stromstärke in der Sekundärspule, und es entstehen auch in dem Lichtbogenkreise Stromschwankungen. Der Lichtbogen gibt die Töne laut und deutlich wieder.

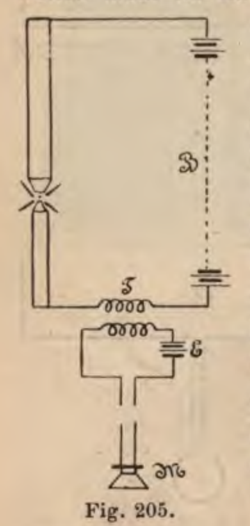


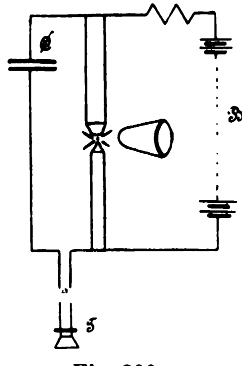
Fig. 205.

Um gute Effekte zu erzielen, muss

1) Diese kann, wenn ihr Widerstand hoch genug ist, zugleich als Vorschaltwiderstand dienen.

man zwischen dünnen Homogenkohlen einen möglichst langen Lichtbogen herstellen; es wird empfohlen, Kohlen zu benutzen, die mit einer Salzlösung (z. B. mit Sodalösung) imprägniert sind.

Den vorigen Versuch kann man umkehren, den Lichtbogen gleichsam als Mikrophon benutzen (s. Fig. 206). Um zu verhindern, dass der Batteriestrom in das Telephon gelangt, schaltet man vor dasselbe einen Kondensator.


Fig. 206.

Bei der Lichttelephonie ordnet man den Lichtbogen so an, dass er sich in dem Brennpunkte eines Scheinwerfers befindet. Die Schaltung auf der sprechenden Station ist dieselbe wie diejenige in Fig. 205. Spricht man in das Mikrophon, so nimmt die Lichtintensität schnell ab und zu, entsprechend den Schwingungen der Membran. Auf der empfangenden Station fallen die Strahlen auf eine Selenzelle (s. diese), die mit einem Telephon und einigen Elementen in Serie geschaltet ist. Die Widerstandsänderungen des Selens erfolgen so schnell, dass sie den Lichtschwankungen zu folgen vermögen.

11. **Die elektrische Klingel** besteht in der Hauptsache aus einem Wagner-Neefschen Hammer. In der schematischen Figur 207 ist *E* der Elektromagnet, *A* ein Anker mit dem Drehungspunkte *D*, *S U* die Unterbrechungsvorrichtung, *G* die Glocke, *K* endlich der Druckknopf. Letzterer besteht aus zwei federnden Metallstreifen und einem aus Horn oder

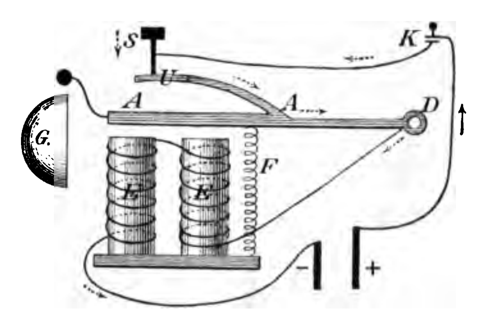


Fig. 207.

dergl. angefertigten Knöpfchen; durch Druck auf letzteres werden die Blattfedern zur Berührung gebracht, so dass der Strom

geschlossen wird. Zieht der Elektromagnet den Anker *A* an, so wird der Strom bei *U* unterbrochen, und die Feder *F*[1]) drückt den Anker wieder in die Höhe.

Bei elektrischen Klingelanlagen benutzt man meistens Leclanché-Elemente (s. S. 235). Funktioniert die Anlage nicht, so untersuche man zuerst die Klingel. Der an einer Schraube befestigte Kontaktstift *s* muss die Blattfeder *U* berühren, nähert man den Anker dem Elektromagnet, so muss zwischen *s* und *U* ein kleiner Luftzwischenraum eingeschaltet sein. An zweiter Stelle sind die Elemente zu revidieren; hierbei ist auch darauf zu achten, dass an den Anschlussklemmen guter metallischer Kontakt vorhanden ist. Seltener liegt der Fehler in den Druckknöpfen oder in der Leitung.

Selbsttätige elektrische Läutesignaleinrichtungen dienen zur Sicherung unbewachter Bahnübergänge. Zu beiden Seiten des Bahnüberganges werden am Fahrgleis Schienenkontakte verlegt, die auf das Schaltwerk in dem Sinne wirken, dass das Läutewerk in Tätigkeit kommt (Läutekontakte). Letzterer Vorgang findet nur dann statt, wenn die Kontakte durch den Zug in der Richtung zum Bahnübergang befahren werden. Ein dritter Schienenkontakt wird unmittelbar am Bahnübergang verlegt. Dieser Kontakt (Ruhekontakt) wirkt beim Befahren durch den Zug in beiden Fahrrichtungen so auf das Schaltwerk, dass dieses das Läutewerk zur Ruhe bringt. Das Läutewerk ist mit der nächstgelegenen Station durch die Arbeitsleitung verbunden; dort befindet sich die Stromquelle und ein zur Kontrolle dienender Wecker.

12. **Das elektrische Zeigerwerk oder die elektrische Nebenuhr.** Es soll nur das Prinzip dieses Apparates, den man z. B. auf allen grösseren Bahnhöfen sieht, dargelegt werden. An einer Normaluhr, etwa einer gut gehenden Pendeluhr, ist eine Vorrichtung angebracht, durch die ein elektrischer Strom in jeder Minute einmal geschlossen wird. Dies lässt sich etwa folgendermaßen bewerkstelligen. Ein Rädchen (Fig. 208), an dem eine Feder befestigt ist, wird durch das Werk der Normaluhr in

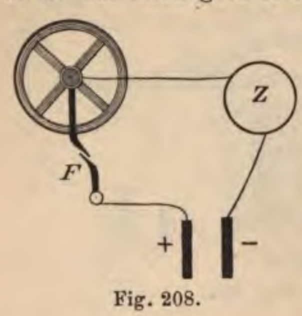


Fig. 208.

1) Die Feder *F* fehlt in Wirklichkeit; statt dessen ist der Anker an einem federnden Metallstreifen befestigt.

jeder Minute einmal umgedreht. Unterhalb des Rädchens sei eine zweite ruhende Feder *F* so angebracht, dass die Radfeder mit ihr Kontakt erhalten kann. Eine Stromquelle, das Zeigerwerk *Z* und das Rädchen, auf dessen Achse eine Schleiffeder[1]) liegt, sind hintereinander geschaltet; der Stromkreis wird einmal in jeder Minute für kurze Zeit geschlossen.

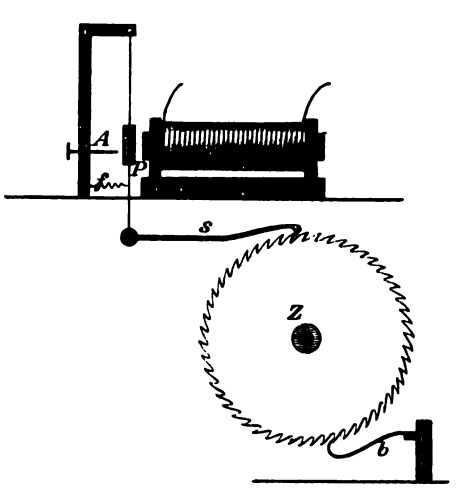


Fig. 209.

Der Hauptteil des Zeigerwerkes ist ein Elektromagnet (siehe Fig. 209). Der leicht drehbar angeordnete Anker *A* ist mit einem Stäbchen *s* fest verbunden. Fliesst Strom durch die Windungen des Elektromagnets, so bewegt sich das Stäbchen *s* nach rechts, und sein Haken greift in die folgende Lücke des Zahnrades *Z* ein. Wird der Strom unterbrochen, so zieht die Feder *f* das Stäbchen zurück. Der Sperrhaken *b* verhindert eine rückgängige Bewegung des Zahnrades. Die Drehung des Zahnrades wird auf die Uhrzeiger übertragen.

1) Diese ist in der Figur nicht gezeichnet.

Neunzehntes Kapitel.

Elektrische Kraftübertragung und elektrische Beleuchtung.

I. Kraftübertragung.

1. Entfernung und Spannung. Die wichtigste Anwendung, die die Elektrizität findet, ist die Übertragung und Verteilung der Kraft. Dieses Problem wird von der Elektrotechnik in der Weise gelöst, dass die zur Verfügung stehende (Wasserkraft), oder in Kraftmaschinen (Dampfmaschinen etc.) aus der potentiellen Energie der Brennstoffe erzeugte mechanische Arbeit in elektrische Energie umgewandelt wird und diese für Beleuchtungs- und motorische Zwecke Verwendung findet. Als erster Grundsatz bei der Projektierung einer elektrischen Kraftübertragung gilt die Regel: je grösser die Entfernung zwischen dem Krafterzeugungs- und dem Kraftverbrauchsorte ist, um so grösser muss die Spannung des Stromes sein. Dieser Satz soll an einem Beispiele erläutert werden. Eine Wasserkraft von 1000 Pferdekräften an einem Orte A soll in der Stadt B ausgenutzt werden, die von A eine Entfernung von 20 km hat. Nehmen wir zunächst an, man wollte durch eine Turbine eine Gleichstrommaschine antreiben, die 1000 Volt Spannung liefert, und 20% Energieverlust in der Leitung zulassen. Es fragt sich, wie gross müsste der Querschnitt der Leitung gewählt werden?

1000 PS sind äquivalent 1000.736 Watt; die Stromstärke muss also $\frac{1000 \,.\, 736}{1000} = 736$ Amp. betragen. Der Energieverlust in Prozenten ist durch den prozentualen Spannungsverlust gegeben; letzterer darf also 200 Volt betragen. Nun ist der Spannungsverlust = Stromstärke $\times$ Widerstand. Also

$$200 = w \,.\, 736 \text{ und } w = 0{,}27 \text{ Ohm.}$$

Die Länge der beiden Leitungsdrähte beträgt 40 km = 40 000 m. Nennt man also den zu berechnenden Querschnitt q,

so ist, da allgemein $w = \frac{L \cdot \varrho}{q}$ und ϱ für Kupfer angenähert den Wert $\frac{1}{60}$ hat,

$$0{,}27 = \frac{40\,000}{60\,q}. \quad \text{Man findet } q = 2470 \text{ qmm.}$$

Man sieht, dass wegen des erforderlichen, ausserordentlich grossen Drahtquerschnittes das Problem in der angegebenen Weise nicht gelöst werden kann. Wiederholt man die Berechnungen unter der Annahme, dass die Spannung 2000 Volt beträgt, so findet man, dass der Leitungsquerschnitt $\frac{2470}{4}$ qmm betragen müsste. Allgemein gilt der Satz, dass unter sonst gleichen Umständen der Leitungsquerschnitt mit dem Quadrate der Spannung abnimmt. Dieser Satz besagt aber auch, dass man aus ökonomischen Rücksichten die Spannung der Entfernung anpassen muss.

Der Verwendung des Gleichstromes bei elektrischen Kraftübertragungen wird eine Grenze gezogen durch den Umstand, dass Gleichstrommaschinen für mehr als etwa 4000 Volt und grosse Leistungen nicht gebaut werden können. Bei hohen Spannungen bilden sich nämlich am Kommutator leicht starke Funken, die zu einer baldigen Zerstörung dieses Maschinenteiles führen. Dagegen kann man in Wechselstrommaschinen viel höhere Spannungen als die angegebene erzeugen und ausserdem in Transformatoren die Spannung nach Belieben erhöhen. (Näheres s. S. 200.) Aus den Vorzügen des Wechselstromes ergibt sich, dass für Kraftübertragungen auf grosse Entfernungen nur diese Stromart in Betracht kommt.

Einige der wichtigsten Systeme der Kraftübertragung sollen jetzt ganz kurz gekennzeichnet werden.

2. **Gleichstromverteilungssysteme.** a) Das Zweileitersystem. Der in der Dynamo erzeugte Strom wird zwei auf der Schalttafel montierten Kupferschienen, den Sammelschienen, zugeführt. Dort beginnt die Hauptstromverteilung, indem, wenigstens in den Fällen, wo die Zentrale innerhalb oder dicht an der Grenze des mit elektrischer Energie zu ver-

sorgenden Gebietes liegt, nach verschiedenen Richtungen hin Leitungen gelegt werden. Diese Leitungen, die man Speise- oder Hauptleitungen nennt, geben unterwegs keinen Strom ab, erst an den Speisepunkten erfolgt die weitere Verteilung. Jeden Speisepunkt kann man als eine kleinere Zentrale ansehen, der ein bestimmter Bezirk zugewiesen ist, den er mit elektrischer Energie zu versorgen hat. Man kann z. B. die Enden der Speiseleitungen an Kupferringen befestigen, von denen neue Leitungen nach verschiedenen Richtungen hingehen. Diejenigen Leitungen, die, von den Speiseleitungen ausgehend, den Strom den verschiedenen Strassen zuführen, nennt man Verteilungsleitungen [1]).

Bei ausgedehnten Anlagen verbindet man die einzelnen Speisepunkte durch eine besondere Leitung miteinander, die man als Ausgleichs- oder Ringleitung bezeichnet. Durch diese werden Spannungsunterschiede zwischen den verschiedenen Speisepunkten ausgeglichen.

Ausser den genannten Leitungen werden noch (dünne) Prüfdrähte verlegt. Durch diese werden Verbindungen zwischen der Zentrale und den Speisepunkten hergestellt; sie dienen dazu, die Spannung an den Speisepunkten zu kontrollieren.

Die Betriebsspannung bei Zweileiteranlagen betrug früher meistens 110 Volt. In neuerer Zeit ist eine grössere Anzahl von Zentralen nach dem Zweileitersystem mit 220 Volt Betriebsspannung ausgeführt worden mit Rücksicht auf die grosse Ausdehnung des mit Strom zu versorgenden Gebietes.

In den meisten Fällen wird parallel zur Dynamo eine Akkumulatorenbatterie geschaltet. Diese Anordnung hat folgende Vorzüge: 1) die Anlage ist gegen Belastungsschwankungen weniger empfindlich, die Lampen brennen also ruhiger; 2) man kann kleinere Maschinen wählen; 3) bei geringem Stromverbrauch (morgens früh, in der Nacht, im Sommer) übernehmen die Akkumulatoren allein die Speisung der Lampen und Motoren (Vereinfachung der Bedienung); 4) bei Betriebsstörungen bildet die Batterie eine Reserve.

Die S i c h e r u n g e n (Schmelzsicherungen) gehören in die Klasse der automatischen Ausschalter. Sie haben den Zweck, die Leitungsdrähte, Apparate etc. gegen die Gefahren, die ein zu

---

1) Die Gründe, die zu der beschriebenen Anordnung führten, sind: 1) allen Lampen und Motoren soll möglichst dieselbe Spannung zur Verfügung stehen; 2) Unabhängigkeit der einzelnen Teile des Netzes von den anderen.

starker Strom hervorrufen kann, zu schützen. Bei normaler Spannung kann der Strom hauptsächlich durch Kurzschluss eine bedrohliche Stärke erreichen. Wenn die Stromstärke zu gross wird, erwärmt sich der stromdurchflossene Leiter stärker als zulässig ist, er kann unter Umständen glühend werden und durchschmelzen. Die Sicherungen bestehen aus Bleistreifen, Silberdrähten etc., die in die Leitungen eingesetzt werden; ihr Querschnitt wird so bemessen ist, dass sie bei einer gewissen Stromstärke durchschmelzen, so dass der Strom unterbrochen wird.

b) Das Dreileitersystem mit 2 × 110 Volt verhält sich in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der ganzen Anlage ungefähr so wie das Zweileitersystem mit 220 Volt, hat aber vor diesem den Vorzug, dass die Lampen mit 110 Volt Spannung brennen [1]). Vielfach werden zwei Dynamomaschinen für dieselbe Spannung und Leistung in Reihe geschaltet (s. Fig. 210).

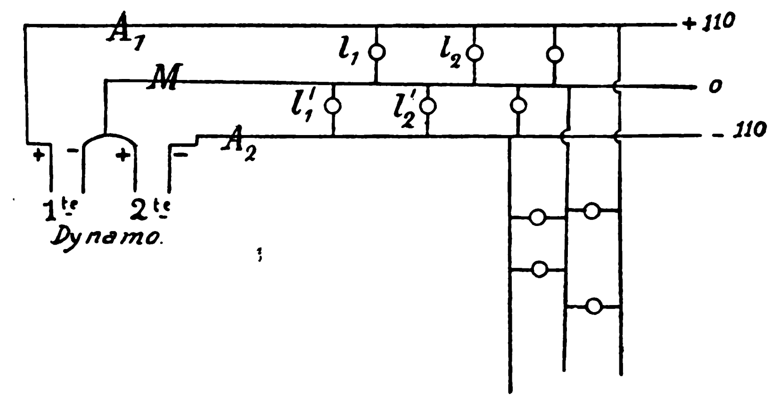


Fig. 210.

Die drei Leiter werden mit den freien Polen und mit der Mitte verbunden. Die ersteren beiden Drähte werden Aussenleiter genannt, den Draht M bezeichnet man als Mittel- oder Nullleiter. Zwischen A_1 und M besteht eine Potentialdifferenz von 110 Volt, ebenso zwischen A_2 und M, während zwischen den beiden Aussenleitern eine Spannung von 220 Volt besteht.

1) Glühlampen für 110 Volt brennen ökonomischer als solche für 220 Volt; der Vorzug der niederen Spannung tritt besonders bei Bogenlampenbeleuchtung zu Tage.

Die Lampen werden gleichmässig auf die beiden Netzhälften verteilt. Sind beide Netzhälften gleich stark belastet, d. h. brennt von jeder Gruppe dieselbe Anzahl von Lampen, so ist der Mittelleiter stromlos. Man kann sich nämlich in diesem Falle die Lampen zu Paaren geordnet denken, z. B. l_1 und l'_1, l_2 und l'_2, so dass die Lampen je eines Paares hintereinander und die einzelnen Paare parallel geschaltet sind. Man kann also den grössten Teil des Mittelleiters entfernen, ohne dass sich etwas ändert. Ist die Belastung der beiden Netzhälften eine ungleiche, so fliesst durch den Mittelleiter entweder Strom nach den Maschinen hin oder von den Maschinen fort[1]). Da bei richtiger Verteilung der Lampen die Differenz zwischen der Anzahl der brennenden Lampen in der einen und in der anderen Hälfte nicht gross ist, so kann für den Mittelleiter ein kleinerer Querschnitt gewählt werden als für die beiden Aussenleiter. Motoren schliesst man meistens an die beiden Aussenleiter an; natürlich muss man dann Motoren wählen, die für die volle Betriebsspannung (220 Volt) gebaut sind.

In den letzten Jahren sind verschiedene grosse Zentralen nach dem Dreileitersystem 2×220 Volt ausgeführt worden. Dieses System ermöglicht unter sonst gleichen Umständen die Überwindung einer viermal so grossen Entfernung wie das Zweileitersystem mit 220 Volt Betriebsspannung.

3. **Wechselstromverteilungssysteme.** Hier kommen hauptsächlich Einphasenstrom und Drehstrom in Betracht. Das Einphasensystem ist einfacher als das Drehstromsystem (besonders die Montage), es hat jedoch den Nachteil, dass es für Motorenbetrieb weniger geeignet ist; auch ist der Kupferaufwand beim Drehstromsystem unter sonst gleichen Umständen um etwa 25 % kleiner als beim Einphasensystem. Aus diesen Gründen nimmt das Drehstromsystem bei Kraftübertragungen in grossem Maßstabe eine dominierende Stellung ein.

---

1) Es mögen z. B. die Lampen l_1, l_2 und l'_1 brennen, und jede Lampe verbrauche $1/2$ Amp. (bei 110 Volt Potentialdifferenz an den Enden des Glühfadens). Durch A_1 fliesst 1 Amp., davon geht die Hälfte durch l'_1, durch die zweite Dynamo zur ersten Dynamo, die andere Hälfte fliesst durch den Mittelleiter in die erste Dynamo.

Das Problem der Kraftübertragung mittels Wechselstromes wird folgendermaßen gelöst. Der in dem Generator erzeugte Strom wird, wenn eine Spannungserhöhung nötig ist, in einem Transformator auf hohe Spannung gebracht. Der hochgespannte Strom durchfliesst die Fernleitung und wird an dem Konsumorte auf die Gebrauchsspannung herabtransformiert.

Bei den Wechselstromverteilungssystemen mit Transformatoren sind zwei Fälle zu unterscheiden. Bei dem sogenannten Einzel-Transformatorensystem hat jedes Haus oder jeder Konsument seinen besonderen Transformator, der von dem Primärnetz gespeist wird. In diesem Falle muss das Primärnetz wie bei einer Gleichstromanlage ausgebaut sein. Die andere Anordnung besteht darin, dass eine Reihe von passend verteilten, grösseren Transformatoren vom Primärnetz gespeist werden; diese geben den sekundären Strom an ein gemeinschaftliches Sekundärnetz ab. Jetzt müssen die sekundären Leitungen allen Strassenzügen folgen, während die primären Leitungen nur nach einzelnen Punkten hingehen; die Transformatoren kann man mit den Speisepunkten einer Gleichstromanlage vergleichen und die primären Leitungen mit den Speiseleitungen, das sekundäre Netz entspricht den Verteilungsleitungen.

Über die Schaltung der Lampen und Motoren bei Drehstromanlagen wurde früher das Nötige gesagt (s. S. 157). Bei überwiegendem Lichtkonsum haben Ungleichheiten in der Belastung der drei Zweige (Phasen) Ungleichheiten der Phasenspannungen (Lampenspannungen) zur Folge. Ein Mittel, die Spannung an den Lampen von der ungleichen Belastung der Phasen unabhängiger zu machen, besteht darin, dass man eine vierte Leitung verlegt, die von dem neutralen Punkte des in Stern geschalteten Drehstromsystems ausgeht, und die Lampen zwischen die drei Hauptleitungen und die neutrale Leitung legt[1]).

4. **Elektrische Strassenbahnen.** Die erste praktische Anwendung der Elektrizität für den Strassenbahnbetrieb brachte Werner von Siemens i. J. 1879; eine von ihm konstruierte

1) Nennt man also die drei Hauptleitungen L_1, L_2, L_3 und die neutrale Leitung N, so verbindet man die erste Lampe mit L_1 und N, die zweite mit L_2 und N, die dritte mit L_3 und N, die vierte mit L_1 und N etc.

Versuchsbahn, die auf der Berliner Industrie-Ausstellung vorgeführt wurde, erregte grosses Aufsehen. Die erste dem allgemeinen Verkehr dienende elektrische Bahn in Lichterfelde, erbaut von Siemens & Halske, wurde am 12. Mai 1881 eröffnet.

Von den verschiedenen Systemen hat dasjenige, das man kurz als oberirdische Stromzuleitung bezeichnet, die grösste Verbreitung gefunden. Mit unterirdischer Stromzuführung sind nur wenige Anlagen ausgeführt worden, auch Bahnen mit reinem Akkumulatorenbetrieb findet man selten. Von den verschiedenen Stromarten wird in den weitaus meisten Fällen Gleichstrom verwendet, nur bei einer geringen Anzahl von Bahnanlagen bedient man sich des Wechselstromes (Drehstromes).

Oberirdische Stromzuführung. Der in einer Zentralstelle erzeugte Strom von 500—600 Volt[1]) wird durch eine über das ganze Bahnnetz sich ausdehnende oberirdische Leitung den einzelnen Wagen zugeführt. Die Stromabnahme aus dem Fahrdrahte erfolgt durch eine nach oben federnde Stange, die an ihrem Ende mit einer Rolle versehen ist. Statt der Rolle verwenden die Siemens-Schuckert-Werke einen Gleitbügel; die obere Seite dieses Bügels (aus Aluminium) bildet einen flachen Bogen, auf dem der Fahrdraht gleitet.

Jeder Wagen ist mit einem oder mehreren Motoren (Hauptstrommotoren) ausgerüstet; diese werden durch den Bahnstrom erregt; die Drehung des Ankers wird durch Zahnräder auf die Räder des Wagens übertragen. Für die Rückleitung des Stromes[2]) zur Zentrale werden die Schienen benutzt (s. das Schema Fig. 211). Der Fahrdraht, auch Arbeitsleitung genannt, ein hartgezogener Kupfer- oder Bronzedraht

1) In einzelnen Fällen beträgt die Spannung 900—1000 Volt.

2) Bei langen und stark belasteten Strecken werden die Ströme nicht lediglich durch die Schienen zur Zentrale zurückgeleitet, weil sonst grössere Spannungsverluste und infolge davon Telephonstörungen und galvanische Zerstörungen der Gas- und Wasserleitungen entstehen würden. In solchen Fällen legt man besondere, isolierte Rückleitungen an (Bleikabel), die man mit geeigneten Punkten des Schienennetzes verbindet.

von 7—8,5 mm Durchmesser, wird von Armauslegern oder von Querdrähten aus Stahl getragen, die entweder an Masten oder an Rosetten befestigt sind. Unter den an den Häusern befestigten Rosetten befinden sich Schalldämpfer.

Wenn der Fahrdraht direkt an die Dynamo angeschlossen ist und sonst keine Zuleitungen vorhanden sind, so ist der Spannungsabfall bei grosser Streckenlänge ein bedeutender, ausserdem aber ist die Betriebssicherheit eine nur geringe. Nehmen wir nämlich an, dass der Fahrdraht an irgend einer Stelle bricht; es sind dann alle Wagen stromlos, die sich,

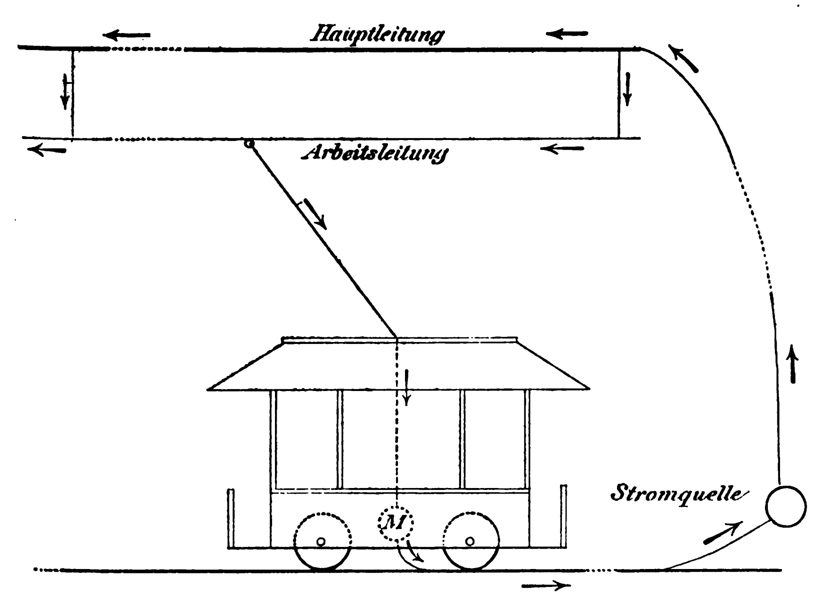


Fig. 211.

von der Zentrale aus gesehen, jenseits der Bruchstelle befinden; ferner wird bei einem in einem Wagen auftretenden Kurzschlusse [1]) der Strom in der Zentrale durch den automatischen Starkstromunterbrecher ausgeschaltet, so dass die ganze Strecke

1) Wenn die Pole einer Stromquelle durch einen relativ sehr kleinen Widerstand miteinander verbunden sind, so sagt man, dass Kurzschluss bestehe. Man vergl. auch die Bemerkungen über das Einschalten eines Motors auf S. 183.

stromlos ist. Von den verschiedenen Stromverteilungssystemen, die man ersonnen hat, um diese Mängel zu beseitigen, seien folgende erwähnt[1]).

1) Bei dem sogenannten Leitersystem ist der eine Pol der Dynamo mit den Schienen verbunden, der andere mit der Speise- oder Hauptleitung (s. Fig. 211 S. 379). Diese ist in Abständen von einigen Hundert Metern durch kurze Leitungen mit dem Fahrdrahte verbunden. Man kann sich leicht an der Hand der schematischen Figur 211 klar machen, dass bei Drahtbruch die Betriebsstörung auf eine kleinere Strecke beschränkt ist. Der Mangel, dass jeder einzelne Wagen den auf der Station befindlichen Stromunterbrecher zum Ausschalten veranlassen kann, bleibt bestehen. Die Speiseleitung wird in Städten meist unterirdisch verlegt.

2) Eine der vorigen Anordnung ähnliche ist in Fig. 212 schematisch dargestellt. Der Fahrdraht ist durch kurze, nicht

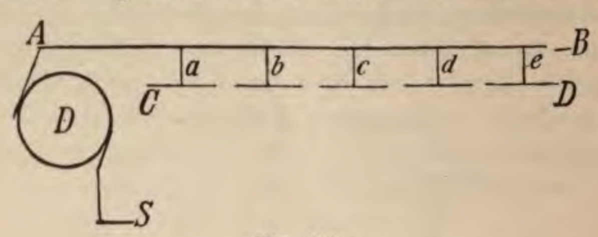


Fig. 212.

leitende Verbindungen (Isoliermuffen) in einzelne Abschnitte zerlegt, von denen jeder seine eigene Querverbindung $a, b, c \ldots$ hat. Der Vorteil, den die Zerlegung der Arbeitsleitung in kleinere Abschnitte gewährt, ist eine Vergrösserung der Betriebssicherheit. Die Querverbindungen werden gewöhnlich durch Schmelzsicherungen oder durch selbsttätige Ausschalter geschützt, so dass bei einem Kurzschlusse nur die dem betreffenden Abschnitte zugehörige Querverbindung unterbrochen, nicht aber der Hauptausschalter der Station geöffnet wird. Hierzu kommt noch der Vorteil, dass, wenn ein Brand in einem in der Nähe des Bahnnetzes gelegenen Gebäude aus-

1) Nach Bell-Rasch, Stromverteilung für elektrische Bahnen.

bricht, ein Gebiet sehr leicht durch Ausschaltung der Querleitung stromlos gemacht werden kann.

Unterirdische Stromzuführung. Die Verunzierung der Strassen und Plätze durch die gespannten Drähte war die Veranlassng, dass verschiedene Systeme der unterirdischen Stromzuführung ausgebildet wurden. Von diesen soll das Schlitzkanalsystem kurz besprochen werden. Unter der einen Schiene befindet sich ein Kanal mit einem Schlitz von 30 mm Breite. Im Innern dieses Kanals laufen seitlich vom Schlitz die an Isolatoren befestigten Kontaktleitungen in Form eines aufrecht stehenden Doppel-T-Eisens mit abgerundeter Oberfläche. Diese sind mit den Polen der Dynamo verbunden. Der Stromabnehmer besteht aus einer gut isolierten Platte, die an ihrem unteren Ende zwei drehbare und federnde Metallzungen trägt. Diese legen sich auf die Leitungsschienen im Kanal. Die oberen Enden der Platte sind mit den Motorzuleitungen verbunden.

Da eine besondere, gegen die Erde isolierte Hin- und Rückleitung vorhanden ist, so ist das Auftreten von sogen. vagabundierenden Strömen [1]) verhindert.

Die Regulierung der Fahrgeschwindigkeit kann nach verschiedenen Methoden erfolgen. Wird vor den Motor Widerstand geschaltet, so wird seine Klemmenspannung und daher auch seine Tourenzahl geringer. Sind zwei Motoren vorhanden, so können diese in Reihe oder parallel geschaltet werden. Ferner wird eine Regulierung in der Weise vorgenommen, dass die Magnetwickelung in Unterabteilungen zerlegt wird, die verschieden geschaltet werden (s. S. 184).

---

1) Zwischen zwei Punkten A und B der Schiene besteht eine Potentialdifferenz, die durch i.w gegeben ist. Da die Schiene mit der Erde in Verbindung steht, so gehen zahlreiche bogenförmige Stromfäden von A durch die Erde nach B (ähnlich wie Kraftlinien zwischen zwei Magnetpolen). Diese Nebenströme nennt man vagabundierende Ströme. Befindet sich in der Nähe der Schienen ein Gas- oder Wasserleitungsrohr, so treten Stromfäden in dieses ein und an einer anderen Stelle wieder aus. Ist die Erde in der Umgebung des Rohres feucht — was wohl immer der Fall ist —, so findet an den Ein- und Austrittsstellen der Stromfäden Elektrolyse statt. Da, wo Sauerstoff frei wird, wird das Eisen oxydiert.

Von den zahlreichen Bremsenkonstruktionen seien folgende erwähnt: a) die Spindelbremse mit Bremsklötzen, b) die Zangenbremse — eine Zange umfasst den Schienenkopf und hält den Wagen fest, c) die Fallbremse — keilförmige Klötze fallen auf die Schienen, d) die Luftdruckbremse — komprimierte Luft tritt nach Öffnung eines Ventils in den Bremscylinder mit Kolben; dieser drückt die Bremsbacken gegen die Radkränze, e) die Kurzschlussbremse — durch Drehung der Kurbel, die der Wagenführer zum Regulieren des Motorstromes benutzt (Kontrollerkurbel), werden die Motoren zunächst von der Leitung abgeschaltet und dann durch einen kleinen Widerstand geschlossen; sie werden vom Wagen als Generatoren angetrieben, die die lebendige Kraft des Wagens in elektrische Energie (Joulesche Wärme) umwandeln[1]), f) die elektromagnetische Bremse — bestehend aus einem Elektromagnetsystem und einer auf der Radachse befestigten Ankerscheibe; die Bremsung erfolgt z. T. durch Wirbelströme, die in der Ankerscheibe erzeugt werden (s. S. 118).

Das Drehstromsystem hat den Vorzug, dass eine hohe Primärspannung angewandt werden kann. Diese wird in Transformatoren, die auf der Strecke in geeigneten Abständen aufgestellt werden, in eine beliebige Gebrauchsspannung umgewandelt[2]). Ein Nachteil dieses Systems ist der Umstand, dass zwei Luftleitungen und dementsprechend auch zwei Stromabnehmer erforderlich sind; als dritte Leitung wird die Schiene benutzt.

Soll längere Zeit mit verminderter Geschwindigkeit gefahren werden, so wird die sogenannte Kaskadenschaltung benutzt. Es müssen dann aber mindestens zwei Motoren vorhanden sein. Dem einen wird Strom aus den Leitungen zugeführt, der Ankerstrom dieses Motors liefert den Feldstrom für den zweiten Motor.

Bei den Versuchen der Studiengesellschaft für elektrische Schnellbahnen auf der Kgl. Militär-Eisenbahn Berlin-Zossen wurde bei 10000 Volt Spannung (Drehstrom) in den Speiseleitungen eine Fahrgeschwindigkeit bis zu 180 km per Stunde erreicht.

---

1) Im Notfalle lässt sich der Wagen durch Umschalten der Motoren für entgegengesetzte Fahrrichtung anhalten (Gegenstrom).

2) Bei der Valtellina-Vollbahn, die aus verschiedenen bis zu 40 km langen Linien besteht, wird in den Arbeitsleitungen 3000-voltiger Drehstrom verwendet, der den Motoren durch die Stromabnehmer ohne Transformierung zugeführt wird. Näheres siehe Elektrotechnische Zeitschr. 1903, S. 305 ff.

II. Elektrische Beleuchtung.

5. Glühlampen. a) Kohlenfadenlampe. Früher stellte man den Glühfaden aus Bambusfasern o. dergl. her; jetzt benutzt man meistens Zellulose. Man treibt die breiartige Masse durch eine enge Drüse. Um den (glänzend weissen) Fäden die gewünschte Form zu geben, wickelt man sie auf Graphitblöcke. Das Verkohlen erfolgt in Graphittiegeln unter Luftabschluss in den sogen. Karbonisieröfen.

Um gleichmässigen Durchmesser zu erzielen, bringt man die Fäden in einen mit Kohlenwasserstoffgasen angefüllten Raum und erhitzt sie mittels des elektrischen Stromes. Durch die Hitze werden die Gase in der Nähe des Fadens dissoziiert (zerlegt), und zwar wird graphitischer Kohlenstoff frei; dieser schlägt sich auf dem Faden nieder. Die Ablagerung des Kohlenstoffs erfolgt offenbar an den Stellen am stärksten, welche die höchste Temperatur besitzen, das sind aber die dünnsten Stellen des Fadens. Durch dieses Verfahren bewirkt man auch, dass der Faden eine glänzende und dichte Oberfläche erhält (Präparatur).

Die fertigen Glühfäden werden in das Innere eines Glasgefässes (Birne, Kugel oder dergl.) geschoben. Damit man nun den elektrischen Strom dem Faden zuführen kann, muss man in die Glaswand zwei Drähte einsetzen, und zwar müssen diese denselben Ausdehnungskoeffizienten haben wie Glas. Da sich Platin von allen Metallen allein fast genau so stark bei der Erwärmung ausdehnt wie Glas, so ist man trotz des hohen Preises dieses Metalles auf seine Verwendung angewiesen.

An jedes Platindrähtchen schliesst sich nach innen ein Nickeldraht, nach aussen ein Kupferdraht an. Die Nickeldrähte, die an ihrem oberen Ende mit einer Hülse zur Befestigung der Kohlenfäden versehen sind, gehen, damit sich ihr Abstand nicht ändert, durch ein kleines Glasstäbchen hindurch.

An der Glasbirne befindet sich ein Ansatzrohr. Dieses wird mit der Luftpumpe verbunden. Die Evakuierung hat hauptsächlich den Zweck, den Luftsauerstoff zu entfernen. Dieser würde sich mit dem glühenden Faden zu Kohlensäure

verbinden. Bei der Evakuierung bedient man sich, um hohes Vakuum zu erzielen, der Quecksilberluftpumpe. Nachdem das Ansatzrohr dicht an der Birne abgeschmolzen worden ist, wird die Lampe in den Lampensockel oder Lampenfuss eingesetzt. Der Edisonsche Fuss besteht aus einem mit einem Gewinde versehenen Teile (*G* in Fig. 214) und dem Boden *F*. An diese beiden Teile, die gegeneinander isoliert sind, werden die aus der Birne herausragenden Zuleitungsdrähte befestigt. Der Zwischenraum zwischen Birne und Sockel wird durch Gips oder eine Mischung aus Gips, Glyzerin und Bleiglätte ausgefüllt.

Lampenspannung. Soll eine Glühlampe eine ihrem Preise angemessene Anzahl von Stunden brennen, so darf der durch den Glühfaden fliessende Strom einen gewissen Betrag nicht übersteigen, oder die Temperatur des Fadens darf über eine gewisse Höhe nicht hinausgehen. Die betreffende Stromstärke werde mit i bezeichnet. Wenn der stationäre Zustand eingetreten ist, hat der Glühfaden einen gewissen Widerstand, der w Ohm betragen möge [1]). Die normale Spannung zwischen den Enden der Zuführungsdrähte hat also den Wert i . w Volt. Herrscht umgekehrt an den Enden des Glühfadens die Spannung i . w Volt, so fliesst durch die Lampe ein Strom von der gewünschten Stärke. Es genügt also zu wissen, bei wieviel Volt Spannung die Lampe brennen soll. Diese Spannung wird auf dem Sockel angegeben. Auch verhältnismässig geringe Erhöhungen der Spannung über die normale hinaus sind der Lampe schädlich.

Altersbeschlag, Lebensdauer. Man beobachtet bei Glühlampen, dass sich nach einer grösseren Anzahl von Brennstunden auf der Innenseite des Glasgefässes ein dunkler Niederschlag bildet, diesen nennt man den Altersbeschlag. Er besteht aus Substanz in sehr fein verteiltem Zustande, die sich von den in der Birne eingeschlossenen Leitern, hauptsächlich von dem Kohlenfaden, abgelöst hat. Da der im Laufe der Zeit immer dunkler werdende Altersbeschlag Licht absorbiert, so nimmt die Ökonomie der Lampe mit der Brenndauer ab, d. h. der spezifische Verbrauch (gleich Wattzahl pro Kerze) wird grösser. Ein anderer Grund für die Verringerung der Ökonomie ist der, dass der Widerstand des

---

1) Der Widerstand des Kohlenfadens nimmt bei Temperaturerhöhung ab. Wenn die Lampe mit der normalen Spannung brennt, so ist w etwa nur halb so gross wie bei gewöhnlicher Temperatur. Steigt die Lampenspannung, so nimmt der Strom schnell zu, weil nämlich E grösser und zugleich w kleiner wird.

Fadens allmählich grösser wird. Da man die Lampe immer mit derselben Spannung brennen lässt, so verringert sich die Stromstärke und mit dieser die Temperatur des Fadens. Eine geringe Temperaturerniedrigung hat aber eine grosse Abnahme der Helligkeit zur Folge.

Der Wirkungsgrad der Kohlenfadenlampen beträgt nur 3—5 %; es werden also 95—97 % der der Lampe zugeführten Energie in unsichtbare Strahlen (Wärme) umgesetzt.

b) Die Osmiumlampe. Auer von Welsbach, dem Erfinder des Gasglühkörpers, ist es gelungen, aus Osmium, das ein sprödes, hartes, sehr schlecht zu bearbeitendes Metall ist, Glühfäden herzustellen. Statt aus reinem Osmium werden auch Fäden aus einem Gemenge Osmium und seltenen Erden oder aus einer Osmiumlegierung mit einem Oxydüberzug oder endlich aus Osmium mit einem Gehalt an Kohlenstoff angefertigt. Der Faden wird in einen evakuierten Glasbehälter eingeschlossen.

Das Osmium kann, ohne dass es schmilzt, bis zu einer sehr hohen Temperatur erhitzt werden, so dass man, da die Lichtemission mit der Temperatur sehr schnell steigt, einen (relativ) hohen Wirkungsgrad erzielt. Der Stromverbrauch beträgt pro Kerze nur etwa 1,6 Watt (3—4 Watt bei Kohlenfadenlampen). Die Lebensdauer der Osmiumlampe ist eine grössere als diejenige der gewöhnlichen Glühlampe. Ein Mangel der Lampe ist darin zu erblicken, dass sie mit verhältnismässig geringer Spannung (bis zu 44 Volt) und in senkrechter Lage brennen muss. Jedoch werden neuerdings auch Osmiumlampen fabriziert, die in schräger Lage brennen können. Wie man aus der Figur 213 ersieht, werden bei diesen die Glühfäden verankert.

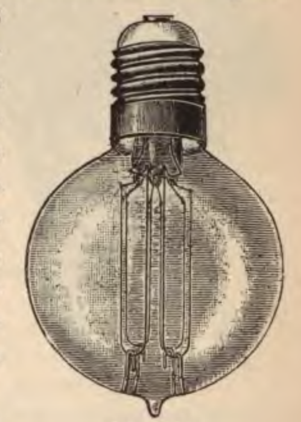


Fig. 213.

c) Die Tantallampe. Tantal wird aus Kolumbiten und Tantaliten durch Behandlung mit Flusssäure als Metallpulver gewonnen. Es verträgt im Vakuum eine Temperatur von 2250—2300°, bevor es zu schmelzen beginnt. Wegen des geringen spezifischen

Widerstandes ergab sich bei der Herstellung der Tantallampe die aussergewöhnliche Forderung, einen Leuchtfaden von etwa $^2/_3$ m Länge, 110 Volt Lampenspannung entsprechend, auf zweckmässige und zuverlässige Weise innerhalb eines Glasgefässes unterzubringen, das die Abmessungen der gewöhnlichen Glühlampe nicht wesentlich überschreitet. Die Aufgabe ist von Siemens & Halske in der Weise gelöst worden, dass die gesamte Drahtlänge in kurze, an ihren Enden durch isolierte Halter gestützte geradlinige Strecken unterteilt wird (s. Fig. 214). Anfang und Ende des zickzackförmig zwischen den isolierten Armen hin- und hergezogenen Drahtes sind durch Platindrähte *P* mit dem Lampenfuss verbunden[1]). Vorzüge der Lampe sind, dass sie schönes, weisses Licht aussendet und nur den halben Strom der gewöhnlichen Glühlampen gleicher Spannung und Lichtstärke verbraucht.



Fig. 214.

b) Die Nernstsche Lampe. Die Umwandlung der elektrischen Energie in Licht ist bei den gewöhnlichen Glühlampen deshalb eine sehr ungünstige, weil man die Temperatur nicht hoch genug steigern kann. Eine günstigere Ökonomie lässt sich nach Nernst mit Hülfe der sehr hitzebeständigen Leiter zweiter Klasse erreichen. Es kommen

1) Der Draht zieht sich während des Brennens zusammen; der anfangs glatte Faden erhält ferner eine wellige Oberfläche. — Bemerkenswert ist noch das Verhalten der Lampe beim Durchbrennen des Leuchtdrahtes. Während bei allen anderen Glühlampen das Durchbrennen gleichbedeutend ist mit Zerstörung, kann es bei Tantallampen vorkommen, dass sie mehrere Male durchbrennen, ohne zu erlöschen.

hier hauptsächlich das Oxyd des Magnesiums, die sogen. Magnesia, ferner die Oxyde der seltenen Erden (Thoroxyd, Zirkonoxyd) in Betracht. Diese Substanzen, die zu den Elektrolyten zu rechnen sind, leiten bei gewöhnlicher Temperatur den elektrischen Strom sozusagen gar nicht; bei höheren Temperaturen aber werden sie zu überraschend guten Leitern.

Der Nernstsche Glühkörper ist ein aus einer porzellanähnlichen Masse geformtes Stäbchen. Es wird an seinen beiden Enden mit einem sehr feinen Platindrahte umwickelt; die Umwickelungsstelle wird mit einer Paste überdeckt, die aus dem gleichen Material besteht wie das Stäbchen. An die Platindrähte werden die Zuleitungsdrähte befestigt. Der Glühkörper wird nicht in ein Vakuum eingeschlossen.

Da der Elektrolyt-Glühkörper bei gewöhnlicher Temperatur den Strom nicht leitet, so muss eine Vorwärmung erfolgen. Am einfachsten ist natürlich die Vorwärmung mittels einer Flamme (Spiritusflamme). Von den selbsttätigen Vorwärmungsmethoden hat die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin die folgende ausgewählt. Aus sehr dünnem Platindrahte wird eine Spirale (*H* in Fig. 215) hergestellt; diese wird, um sie vor der enormen Hitze des Glühkörpers zu schützen, mit einer sehr dünnen Schicht feuerfesten Materials überzogen. Die den Glühkörper *G* in weiten Windungen umgebende Heizspirale wird dem Glühkörper parallel geschaltet. Beim Einschalten der Lampe geht der Strom zunächst durch die Heizspirale, die rotglühend wird[1]). Durch die in dem Platindrahte erzeugte Wärme wird der Glühkörper in 20—30 Sekunden so stark erhitzt, dass er den Strom leitet. Wenn letzteres der Fall ist, wird die Heizspirale durch eine besondere Vorrichtung, deren Hauptbestandteil ein Elektromagnet ist, ausgeschaltet.

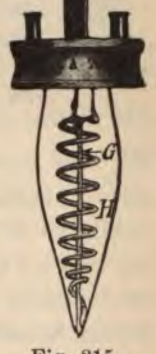


Fig. 215.

Ein wichtiger Bestandteil der Nernst-Lampe ist der Vorschaltwiderstand. Die Elektrolyt Glühkörper zeigen Spannungserhöhungen gegenüber ein merkwürdiges Verhalten. Steigt die Spannung um nur wenige Prozente, so wächst die Stromstärke um einen verhältnismässig

1) Man kombiniert auch eine Nernst-Lampe mit einer oder zwei gewöhnlichen Glühlampen (Express-Lampe). Beim Einschalten brennt zunächst die gewöhnliche Glühlampe; diese wird, sobald die Nernst-Lampe zu leuchten beginnt, selbsttätig ausgeschaltet.

hohen Betrag. Hat man die Spannung bis zu einer gewissen Höhe gesteigert, so beobachtet man, dass ohne jede weitere Änderung der Spannung die Stromstärke zuerst langsam, dann schnell zunimmt, bis der Glühkörper durchbrennt. Es gibt daher für jeden Elektrolyt-Glühkörper eine Spannung, die nicht erreicht werden darf, wenn eine Zerstörung vermieden werden soll (kritische Spannung). Die Differenz zwischen dieser und der Spannung, bei der der Glühkörper brennen soll, ist relativ klein und befindet sich innerhalb der Grenzen der Spannungserhöhungen, die in elektrischen Anlagen vorkommen können. Bei einem direkt an das Leitungsnetz einer Zentrale angeschlossenen Nernstschen Glühkörper ist also die Gefahr vorhanden, dass er infolge zu starken Stromes durchbrennt. Diese Gefahr wird bedeutend verringert, wenn vor den Glühkörper ein Widerstand geschaltet wird, der einen hohen positiven Temperaturkoeffizienten hat. Hierfür benutzt man Eisen. Da sich dieses besonders bei stärkerer Erwärmung mit Sauerstoff verbindet, so wird der Vorschaltwiderstand in ein Gefäss eingeschlossen, das mit einem indifferenten Gase (Wasserstoff, Stickstoff) angefüllt ist. Damit sich der Vorschaltwiderstand bei anwachsender Stromstärke schnell erwärmt (sein Widerstand schnell wächst), benutzt man feine gezackte Drähte (s. Fig. 216).

Fig. 216.

Die Nernst-Lampe zeichnet sich dadurch vor der Kohlenfadenlampe aus, dass sie sehr schönes, weisses Licht aussendet und dass der Energieverbrauch pro Kerze bedeutend geringer ist (ca. 1,5 Watt). Sie wird gebaut für alle gebräuchlichen Spannungen und für Lichtstärken von 16—750 Normalkerzen.

6. **Der elektrische Lichtbogen**[1]. Werden zwei mit den Polen einer Stromquelle verbundene Kohlenstifte einander genähert, bis eine Berührung erfolgt[2], so findet der Strom an der Berührungsstelle, da der Kontakt nur ein loser ist, einen verhältnismässig grossen Widerstand. Hat die Stromquelle eine genügend hohe Spannung (40—50 Volt), so ist die Stromstärke eine grosse, und es entwickelt sich an der

1) Von Werken, die über das elektrische Bogenlicht erschienen sind, seien folgende erwähnt: Das Bogenlicht und seine Anwendung, von Körting & Mathiesen; Der elektrische Lichtbogen, von Biegon von Czudnoschowski; Der elektrische Lichtbogen, von Berthold Monasch; Der elektrische Lichtbogen, von E. Voit.

2) Bei einem diesbezüglichen Versuche muss man vor die Kohlenstäbchen einen Widerstand legen (s. S. 395).

Berührungsstelle eine bedeutende Wärmemenge. Entfernt man jetzt die Kohlenstifte, die Elektroden, voneinander, so wird eine Schicht heisser Gase und Dämpfe in den Stromkreis eingeschaltet, in der sich zahlreiche feine Kohlenpartikelchen befinden; diese Schicht leitet die Elektrizität ziemlich gut. Die hierbei auftretende Lichterscheinung bezeichnet man als Lichtbogen.

Bei vertikal angeordneten Kohlen kann man von einem Lichtbogen nicht gut reden; man hat aber trotzdem die von Davy herrührende Bezeichnung auch für diesen Fall beibehalten. Übrigens hat Davy nicht zuerst den dauernden Lichtbogen zwischen Kohlenstücken hergestellt und so den Ausgangspunkt zu der Bogenlampenbeleuchtung geliefert, sondern de la Rive (i. J. 1820). „Allerdings mag Davy um die Ausbildung Verdienste besitzen, namentlich durch Steigerung der Länge des „Flammenbogens“, dem, mit einer Voltabatterie von 2000 Zink-Kupferelementen hergestellt, eine Länge von 2,5—10 cm gegeben werden konnte“ (Handbuch der Elektrotechnik I, 1 S. 48).

Projiziert man den zwischen vertikalen Kohlen gebildeten Lichtbogen mittels einer Sammellinse, so erkennt man mehrere Teile: einen violetten Kern, eine grünliche äussere Hülle (Aureole) und eine dazwischen liegende dunkle Zone.

Die beiden Kohlen spitzen sich allmählich an den Enden zu, die negative aber stärker als die positive. An der Endfläche der positiven Elektrode bildet sich eine kleine Grube mit kreisförmigem Rande, der sogen. Krater. Die dort herrschende Temperatur wird von Violle zu etwa 3500° angegeben, während die Temperatur der Kathodenspitze etwa 2700° betragen soll. — Der Wirkungsgrad beträgt ca. 10 %.

Lichtverteilung. Von dem gesamten Lichte, das ein offen brennender Lichtbogen spendet, entfallen auf den Krater ca. 85 %, auf die negative Kohle ca. 10 %, auf den Lichtbogen selbst also nur ca. 5 %. Die Lichtmenge, die ein nackter Gleichstromlichtbogen nach den verschiedenen Richtungen des Raumes hin sendet, ist eine ausserordentlich verschiedene, weil das meiste Licht von der vertieft liegenden Krateroberfläche abgegeben wird und die Kohlen der Ausbreitung des Lichtstromes hindernd im Wege stehen.

Man unterscheidet zwischen der mittleren räumlichen (hemisphärischen) Lichtstärke unterhalb der Horizontalen und der mittleren räumlichen Lichtstärke. Denken wir uns durch die Achsen der vertikal stehenden Kohlen eine Ebene gelegt, in dieser vom Lichtbogen aus nach allen möglichen Richtungen hin gerade Linien gezogen und für jede Richtung die Lichtstärke bestimmt. Das Maximum der Lichtstärke liegt bei etwa 40° unterhalb der Horizontalen. Nimmt man von allen erhaltenen Werten das arithmetische Mittel, so erhält man die mittlere räumliche Lichtstärke; beschränkt man sich auf die Horizontale und die Geraden unterhalb derselben, so erhält man die hemisphärische Lichtstärke. Letztere ist, wenn Reflektoren nicht benutzt werden, für die Bodenbeleuchtung maßgebend.

Bei senkrecht stehenden Kohlen hat der Lichtbogen die Neigung, um die Kohlen zu rotieren. Um diesem Übelstande, der unruhiges, flackerndes Licht zur Folge hat, abzuhelfen, versieht man die positive Kohle mit einem aus Kohle, Wasserglas und Borsäure hergestellten Kern, den man Docht nennt (Dochtkohle). Diese bildet in den Lampen in der Regel die obere Elektrode. Kohlen ohne Docht nennt man Homogenkohlen.

Die Vorgänge im Lichtbogen sind sehr komplizierter Natur, stimmen aber im allgemeinen mit denjenigen bei anderen Arten der Gasentladungen überein. Bemerkenswert ist, dass das Potential zwei Sprünge macht, nämlich einen grossen Sprung an der Grenze zwischen der Anode und der angrenzenden Schicht des Lichtbogens, und einen viel kleineren Sprung an der Grenze des Lichtbogens und der negativen Kohle[1]). Das Potentialgefälle im Lichtbogen selbst beträgt nur einige Volt.

Der Wechselstromlichtbogen. Da sich die Stromrichtung in schnellem Wechsel ändert, so ist bald die obere, bald die untere Kohle die positive. Beide Kohlen nehmen an der Spitze ungefähr dieselbe Gestalt an. Die Lichtverteilung ist oberhalb der Horizontalen nahezu dieselbe wie unterhalb derselben. Gewöhnlich benutzt man bei Wechselstromlampen zwei Dochtkohlen (von gleicher Länge und gleichem Durchmesser), um ruhigeres Licht zu erzielen. Die Ökonomie der gewöhnlichen Wechselstromlampen ist aus verschiedenen Gründen ungünstiger als diejenige der Gleichstromlampen.

Die fortwährenden Änderungen der Stromstärke verursachen eine vibrierende Bewegung der Lichtbogengase, indem sich das

1) Lecher, Wiedem. Ann. 1888, S. 609.

Volumen der Gase mit der Stromstärke ändert. Hierdurch wird das Brummen oder Summen des Lichtbogens verursacht (s. auch S. 306).

Flammenbogen. In neuerer Zeit verwendet man vielfach Kohlen, die mit Salzen imprägniert sind, sei es um eine bessere Lichtausbeute zu erzielen, oder um dem Lichte eine bestimmte Farbe zu geben. Bei Verwendung derartiger Kohlen erzielt man einen bedeutend längeren Lichtbogen, der Flammenbogen genannt wird. Die Kohlen werden oft schräg nebeneinander stehend angeordnet; die beiden Kohlenspitzen und der Lichtbogen sind also abwärts gerichtet, so dass das Maximum der Lichtstärke in die Vertikale fällt.

Der Quecksilberdampflichtbogen. Nach Arons kann man einen Quecksilberlichtbogen mittels eines umgekehrten U-Rohres aus Glas herstellen, das bis zur Krümmung mit Quecksilber gefüllt ist; durch Neigen oder Schütteln des Rohres wird der Strom durch das aus dem einen Schenkel in den anderen fliessende Quecksilber für kurze Zeit geschlossen. Mit der Ausbildung der Quecksilberbogenlampe hat sich besonders C. P. Hewitt beschäftigt; er ersetzte die negative Quecksilberelektrode durch eine Eisenelektrode, wodurch die Konstruktion der Lampe wesentlich vereinfacht wird.

Der Quecksilberlichtbogen sendet ein ruhiges, starkes und scheinbar weisses Licht aus, und zwar leuchtet die ganze Gassäule. In Wirklichkeit ist die Farbe kein reines Weiss, sondern ein bleiches Blaugrün, fast ohne jedes Rot im Spektrum. Da das Quecksilberlicht reich ist an chemisch wirksamen Strahlen, so eignet es sich vorzüglich für photographische Zwecke.

Bezüglich des Wirkungsgrades steht die Quecksilberdampflampe mit an der Spitze der künstlichen Lichtquellen. In einzelnen Fällen hat man 0,4 Watt pro Kerze (incl. Verlust im Vorschaltwiderstand) erreicht.

7. Die Bogenlampen. Der Reguliermechanismus einer elektrischen Bogenlampe muss folgenden Anforderungen genügen: wird die Lampe eingeschaltet, so müssen die Kohlen zur Berührung gebracht und dann sofort voneinander getrennt werden, damit sich der Lichtbogen bilden kann; da ferner die Kohlen an den Spitzen abbrennen und daher der Lichtbogen

allmählich länger, unruhig werden und schliesslich abbrechen würde, so müssen die Kohlen in dem Maße vorgeschoben werden, in dem sie kürzer werden. Die Regulierung erfolgt in der Weise, dass die erforderlichen Bewegungen durch den elektrischen Strom selbst hervorgerufen bezw. ausgelöst werden. Je nach der Art nun, wie man zwecks Betätigung des Regulierwerkes, dessen Hauptbestandteil meistens ein Elektromagnet ist, die Schaltung ausführt, werden die Bogenlampen in Hauptstrom-, Nebenschluss- und Differentiallampen eingeteilt.

Bei den Hauptstromlampen (s. Fig. 217) sind eine Elektromagnetspule s und der Lichtbogen in Reihe geschaltet. (In der schematischen Figur sind p_1 und p_2 die Anschlussklemmen, k_1 und k_2 die Kohlen.) Da der Reguliermechanismus in Tätigkeit tritt, wenn sich die Stärke des Elektromagnets ändert, diese aber von der Stromstärke abhängig ist, so reguliert die Hauptstromlampe auf konstanten Strom. Natürlich muss der Mechanismus so eingerichtet sein, dass sich die

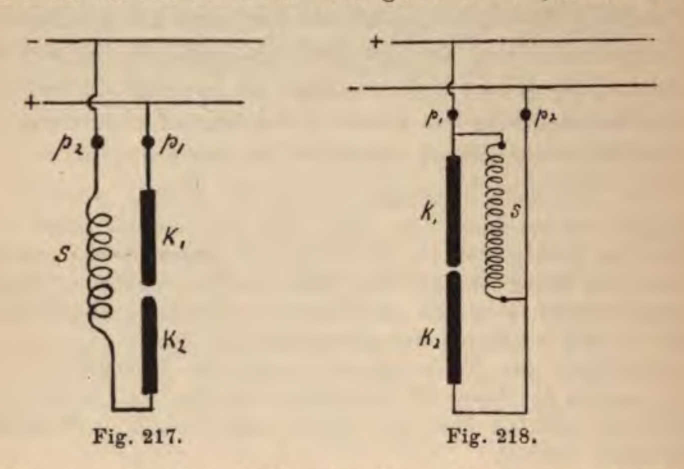


Fig. 217. Fig. 218.

Kohlen vor dem Einschalten berühren, da ja sonst ein Stromkreis nach dem Einschalten nicht vorhanden ist.

Die Nebenschlusslampe. Wie man aus dem Schema (Fig. 218) ersieht, teilt sich der aus der positiven Leitung kommende Strom. Durch die Spule s aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes fliesst ein viel schwächerer Strom als

durch den Lichtbogen. Nennen wir die Lichtbogenspannung (= Klemmenspannung der Lampe) e, den Widerstand der Spule w, so hat der Nebenstrom die Stärke $i = \frac{e}{w}$, denn e ist ja auch die Spannung an den Enden der Spule. Sobald sich also die Lichtbogenspannung ändert[1]), ändert sich auch i. Wird die Lichtbogenlänge infolge Abbrandes der Kohlen grösser, so wächst e und daher auch i; der Reguliermechanismus tritt in Tätigkeit und nähert die Kohlen einander. Die Lampe reguliert also auf konstante Spannung.

Das Prinzip der Differentiallampe kann mit Hülfe der Figur 219 klar gemacht werden. An dem um den Punkt D drehbaren Hebel ist ein Eisenkern S befestigt; diesen suchen die Spulen R_1 und R_2 in sich hineinzuziehen. Die dickdrähtige Spule R_2 ist mit dem Lichtbogen in Serie geschaltet, während die aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes bestehende Spule R_1 im Nebenschluss liegt. Wenn der Strom eingeschaltet wird, berühren sich die beiden Kohlen C_1 und C_2 zunächst nicht, die Spule R_2 ist also stromlos, während durch R_1 ein verhältnismässig starker Strom fliesst[2]). Der Eisenkern wird infolgedessen gehoben (s. S. 96), und die Kohlen kommen zur Berührung. Da jetzt durch die

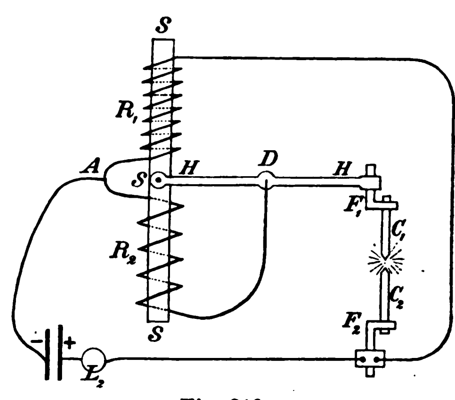


Fig. 219.

1) Die Lampenspannung kann sich, konstante Netzspannung vorausgesetzt, nur dann ändern, wenn vor die Lampe ein Widerstand geschaltet ist.

2) Dieser Strom ist gleich der Netzspannung, dividiert durch den Widerstand in R_1 + dem relativ kleinen Vorschaltwiderstand; wenn die Lampe brennt, so ist der Nebenschlussstrom gleich der Lampenspannung, dividiert durch den Widerstand in R_1.

Hauptstromspule ein starker Strom fliesst, so erfolgt eine Abwärtsbewegung des Eisenkerns, so dass die Kohlenspitzen voneinander getrennt werden und der Lichtbogen entsteht. Wird der Lichtbogen infolge Abbrandes der Kohlen länger, so wächst die Lampenspannung und mit ihr der durch R_1 fliessende Strom, so dass die Spule R_1 den Eisenstab etwas hebt.

Die Lampe heisst Differentiallampe, weil die beiden Spulen auf den Eisenkern S einwirken und infolgedessen die Grösse der Hebeldrehung von der Differenz der beiden auf den Kern wirkenden Kräfte abhängt.

Auf die zahlreichen Lampenkonstruktionen der verschiedenen Firmen einzugehen, würde weit über den Rahmen dieses Buches hinausgehen. Es soll nur eine Lampe einer bekannten Firma beschrieben werden. Bei der Nebenschlusslampe von Körting & Mathiesen wird durch einen Elektromagnet ein schwingendes Laufwerk betätigt. Die Bewickelung des Elektromagnets a (Fig. 220) besteht aus zahlreichen Windungen eines dünnen isolierten Kupferdrahtes. Die Elektromagnetschenkel haben schräge Einschnitte, in die eine Eisenplatte b hineinpasst. Diese, der Anker, bildet die obere Seite des schräg angeordneten rechteckigen Rahmens r (des Ankerrahmens), der um zwei Stifte p drehbar ist. Die dem Anker b gegenüberliegende Seite des Ankerrahmens trägt das Laufwerk, bestehend aus zwei oben mit einem horizontalen Hebelarme versehenen Eisenplatten c und dem Zahnradgetriebe. Über das unterste, zugleich grösste Rad des Laufwerks d ist eine Kette gelegt, die die beiden Kohlenhalter trägt (von diesen ist in der Figur nur der obere kh sichtbar). Das rechte Kettenstück geht durch das Rohr q, das als Führung für den unteren Kohlenhalter dient. Die Spiralfeder e, die einerseits an dem Hebelarme h, anderseits an dem Ankerrahmen befestigt ist, wirkt der anziehenden Kraft des Elektromagnets entgegen.

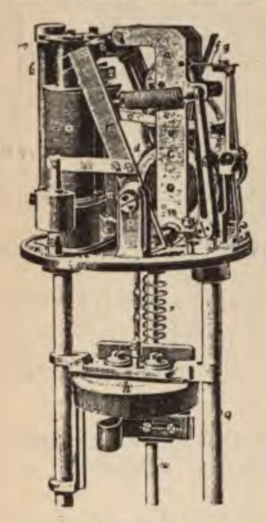


Fig. 220.

Durch die bis jetzt beschriebene Einrichtung können die Kohlen einige Millimeter einander genähert werden. Nehmen wir nämlich an, dass die Lampe eingeschaltet wird. Es fliesst dann durch die Elektromagnetspulen ein kräftiger Strom, so dass

der Anker b stark angezogen wird. Da der Zahnradrahmen c der Bewegung des Ankers folgt, mit dem er fest verbunden ist, so dreht er sich um die unter dem Buchstaben m liegende Achse. Nun nimmt das Kettenrad d an der Drehung des Rahmens teil; mithin wird die obere Kohle um ein kleines Stück gesenkt, die untere um ein gleiches Stück gehoben, so dass sich der Abstand der beiden Kohlenspitzen verringert.

Angenommen, die Kohlen seien durch die Drehung des Kettenrades beim Einschalten der Lampe zur Berührung gebracht worden. Es fliesst dann ein Strom von grosser Stärke durch die Kohlen, und es wächst der Spannungsverlust in dem vor die Lampe geschalteten Widerstande (Vorschaltwiderstand). Dies hat zur Folge, dass die Lampenspannung und daher auch die Stärke des durch die Elektromagnetwickelung fliessenden Stromes sinkt; daher wird die auf den Anker b ausgeübte Zugkraft kleiner, und die Spiralfeder zieht den Ankerrahmen zurück. Durch diese neue Bewegung des Ankers wird eine Trennung der Kohlenspitzen herbeigeführt, so dass sich der Lichtbogen bilden kann. Der Anker stellt sich auf Gleichgewicht zwischen magnetischer Zugkraft und Federkraft ein.

Der Nachschub kommt durch folgende Einrichtung zustande: das oberste Rad des Zahnradgetriebes ist als Flügelrad f ausgebildet. Solange einer der vier Flügel auf der Anschlagzunge g liegt, kann eine Bewegung des Flügelrades und daher auch eine Drehung der anderen Zahnräder nicht erfolgen; eine solche ist aber möglich, wenn die Flügelspitze den Anschlag verlässt. Die Kraft, durch die die Drehung herbeigeführt wird, ist die Differenz zwischen dem Gewichte des oberen und demjenigen des unteren Kohlenhalters.

Durch Drehung der Schraube m kann die Spannung der Spiralfeder [1]) und damit die Lichtbogenspannung bezw. Lichtbogenlänge vergrössert oder verringert werden.

Von den Nebenapparaten für Bogenlampen sei noch der Vorschalt- oder Beruhigungswiderstand erwähnt. Dieser hat folgenden Zweck: wenn eine Bogenlampe eingeschaltet wird, so berühren sich die Kohlenstifte für kurze Zeit. Da während der Berührung der Widerstand im Hauptstromkreise nur gering ist, so wächst der Strom zu einer bedenklichen Grösse an. Um das zu verhindern, legt man vor die Lampe einen passend gewählten Widerstand. Man kann ferner nachweisen, dass (besonders bei der Nebenschlusslampe) die Schwankungen der Netzspannung um so weniger die Lampenstromstärke und daher auch die Ruhe des

---

1) Eine Drehung der Schraube hat nämlich zur Folge, dass sich das obere Ende des Hebels h nach rechts oder nach links bewegt.

Lichtes beeinflussen, je mehr Widerstand zwischen Lampe und Netz liegt. Auch die Wirkungen, die eine plötzliche Änderung des Lichtbogenwiderstandes infolge Inhomogenität der Kohlen zur Folge hat, werden durch den Vorschaltwiderstand abgeschwächt.

Zwanzigstes Kapitel.

Thermoelektrizität.

---

1. Thermoelemente. Seebeck machte i. J. 1823 zuerst die Beobachtung, dass eine direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität möglich sei. Er benutzte eine Vorrichtung, bestehend aus einem Antimonstab und einem aufgelöteten Kupferbügel *Cu* (Fig. 221). Innerhalb des Rechtecks befindet sich eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel. Der Apparat wird so aufgestellt, dass sich die Nadel in der Ebene des Rechtecks befindet. Wird die eine Lötstelle *a* erwärmt [1]), so wird die Nadel abgelenkt; die Ablenkung wird stärker, wenn die andere Lötstelle *b* abgekühlt wird. Die Richtung des Stromes hängt ab von der Richtung, in der sich die Wärme im Antimon bewegt. Wenn also zuerst die Lötstelle *a* die höhere Temperatur hat und bei einem späteren Versuche die Lötstelle *b*, so hat im zweiten Falle der Strom die entgegengesetzte Richtung wie im ersten Falle. Seebeck nannte die so entstandenen Ströme thermoelektrische. Solche Ströme erhält man auch dann, wenn man statt Antimon und Kupfer zwei beliebige andere Metalle benutzt. Man kann die Metalle (und Metalllegierungen) zu einer Reihe ordnen, so dass die elektromotorische Kraft der Kombination bei 1° Temperaturdifferenz der Berührungsstellen um so grösser ist, je



Fig. 221.

1) Da der Schmelzpunkt des Antimons bei 430° liegt, so muss man vorsichtig erwärmen.

weiter die Metalle in der Reihe voneinander entfernt sind. Die Reihe ist nach Seebeck folgende[1]:

+ Antimon, Eisen, Zink, Silber, Gold, Zinn, Blei, Kupfer, Platin, Nickel, Wismut —. Die grösste Thermospannung erhält man also, wenn man Antimon und Wismut miteinander kombiniert; sie beträgt etwa 0,0001 Volt pro 1° Temperaturdifferenz. Der Strom fliesst an der erwärmten Berührungsstelle von dem nachstehenden Metall zum vorstehenden.

Bei dem in Fig. 221 abgebildeten Thermoelemente bilden die beiden Metalle einen geschlossenen Kreis. Man erhält ein offenes Thermoelement, wenn man zwei verschiedene Metalle (Drähte) an einem Ende miteinander verbindet. Angenommen, man benutzt einen Eisen- und einen Silberdraht; die freien Enden seien mit einem Galvanoskop durch Kupferdrähte verbunden. Wir haben dann einen aus metallischen Leitern hergestellten geschlossenen Kreis, nämlich: Eisen, Kupfer (erster Verbindungsdraht, Spule des Galvanoskops, zweiter Verbindungsdraht), Silber, Eisen. Es ist also so, als ob wir in ein geschlossenes Thermoelement (Eisen, Silber, Eisen) einen dritten Leiter (Kupfer) eingeschoben hätten. Die Erfahrung zeigt nun, dass die Einfügung eines oder mehrerer Metalle, deren Endstellen alle dieselbe Temperatur besitzen, auf die Grösse der thermoelektrischen Spannung ohne Einfluss ist[2].

Bezüglich der Spannungsreihe ist noch hinzuzufügen, dass nicht nur die Materialbeschaffenheit, sondern auch die Grösse der Temperaturdifferenz erhebliche Verschiebungen hervorzurufen vermag. Nennen wir die Temperatur der warmen Stelle t_1, diejenige der kalten t_2, so ist keineswegs allgemein die thermoelektrische Spannung proportional $t_1 - t_2$. Diese Proportionalität ist nur für einige Zusammenstellungen von Metallen (z. B. für Platin und Eisen) zwischen relativ kleinen Grenzen (0°—100°) nachgewiesen. Stellt man also die Beziehung zwischen der thermoelektrischen Spannung und der Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$ graphisch dar, so erhält man keineswegs gerade Linien. Als Beispiel diene die

---

1) Die Materialstruktur (Härte) spielt ebenfalls eine Rolle.

2) Beim Verlöten wird ein fremdes Metall (Zinn) eingeschoben. Dadurch wird also die thermoelektrische Spannung nicht beeinflusst, wenn die ganze Lötstelle überall dieselbe Temperatur hat.

Zusammenstellung Zink-Eisen, die von Seebeck eingehend untersucht wurde. Wird t_1-t_2 allmählich vergrössert, so wächst die Spannung bis zu einem Maximum und nimmt dann ab; schliesslich erfolgt eine polare Umkehrung (Richtungswechsel des Stromes).

Von den Versuchen, die thermoelektrischen Erscheinungen zu erklären, verdient vor allem derjenige von C. Liebenow[1]) erwähnt zu werden. Dieser knüpft an die Hypothese von F. Kohlrausch an, dass in einem einzelnen ungleich erwärmten Metallstück an sich durch eine Temperaturdifferenz eine elektromotorische Kraft erzeugt werde[2]), die grösser sei als die von uns an Metallpaaren beobachteten Kräfte, deren Richtung in allen Metallen in Bezug auf das Temperaturgefälle dieselbe sei, so dass man bei der Verbindung zweier Metalle zu einem Element immer nur die Differenz dieser Kräfte beobachte (indem zwei entgegengesetzt fliessende Ströme von der erwärmten Verbindungsstelle ausgehen). Wächst dann z. B. die kleinere elektromotorische Kraft des einen Metalls mit der Temperatur schneller als die des anderen, oder nimmt letztere mit der Temperatur gar ab, während die andere zunimmt, so muss schliesslich ein Punkt erreicht werden, in welchem beide gleich sind, und die elektromotorische Kraft des Ganzen ist null. Geht man noch höher mit der Temperatur, so kehrt sich die Differenz um.

Indem Liebenow die Vergleiche über alle ihm zugänglichen Beobachtungen ausdehnte, ergab sich als allgemeine Regel, dass in allen Metallen die thermoelektrischen Kräfte in gleichem Sinne verlaufen, d. h. alle Metalle werden am warmen Ende positiv. Dagegen zeigen alle Nichtmetalle, z. B. Tellur, Selen, Kiese, das umgekehrte Verhalten, sie werden negativ am warmen Ende. Kombiniert man also ein Metallstück mit einem Nichtmetall, einem Kiese, einer Blende etc., so summieren sich jetzt die elektromotorischen Kräfte der beiden Komponenten. Daher sind auch die elektromotorischen Kräfte von solchen Thermoelementen stets viel grösser als diejenigen aus zwei Metallen.

Wichtige Beobachtungen über die thermoelektrischen Ströme wurden von Egg-Sieberg[3]) gemacht. Es ergab sich, dass man in einem Metall, z. B. in einem Eisendraht, eine wirksame elektromotorische Kraft erhält, wenn man es an einer Stelle erwärmt und dafür sorgt, dass das Temperaturgefälle nach beiden Seiten hin (von der erwärmten Stelle aus) ein ungleiches ist.

---

1) Elektrot. Zeitschr. 1900, S. 246.

2) Bewegung der Wärme ist also mit Bewegung der Elektrizität verbunden. Man vergl. den Peltier-Effekt.

3) Elektrot. Zeitschr. 1900, S. 619.

Lassen wir beispielsweise in ein mit Wasser gefülltes Gefäss einen dünnen Eisendraht eintauchen, der mit einem Galvanometer einen geschlossenen Stromkreis bildet, und erwärmen wir die eine Eintrittsstelle durch eine Stichflamme, so zeigt das Galvanometer einen Strom an.

Der folgende Versuch steht in Widerspruch mit der von Egg-Sieberg ausgesprochenen Ansicht. Befestigt man an die Klemmen eines Spiegelgalvanoskops einen langen Eisendraht, und erwärmt man diesen ungefähr in der Mitte mittels einer Bunsen- oder Spiritusflamme, so ist offenbar das Temperaturgefälle nach beiden Seiten hin dasselbe; trotzdem erhält man einen starken Ausschlag.

2. Thermosäule. Die thermoelektrische Spannung kann dadurch erhöht werden, dass man eine Reihe von Thermoelementen (ohne fremde Metalle dazwischen zu schalten) zu einer Kette vereinigt. Werden z. B. Wismut- und Antimonstäbchen abwechselnd so aneinander gelötet, dass eine zickzackförmige Reihe entsteht (Fig. 222), und erwärmt man alle Lötstellen, die nach derselben Seite hin gerichtet sind, also 1, 2, 3, so addieren sich die elektromotorischen Kräfte.

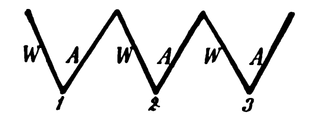


Fig. 222.

Am meisten Verbreitung hat wohl die Gülchersche Thermosäule gefunden, die besonders für die Ladung von kleineren Akkumulatorenbatterien sehr gut geeignet ist. Sie besteht aus zwei hintereinander geschalteten Ketten von Elementen aus Nickel und einer Antimonlegierung. Die Erhitzung der gleichnamigen Lötstellen erfolgt durch kleine Gasflämmchen; damit sich die anderen Berührungsstellen schnell abkühlen, sind an den beiden Seiten Bleche angebracht. Eine Säule von 66 Elementen liefert eine elektromotorische Kraft von etwa 4 Volt und hat einen inneren Widerstand von etwa 0,7 Ohm; sie gebraucht stündlich ungefähr 170 Liter Leuchtgas.

Bei Untersuchungen über Wärmestrahlung werden vielfach Thermosäulen nach Melloni mit quadratischer Anordnung der Elemente aus Wismut und Antimon benutzt.

3. Elektrische Temperatur-Messapparate. Für viele industrielle Betriebe ist es von Wichtigkeit, Temperaturfern-

messungen zu machen, z. B. bei Zentralheizungen, Kühlanlagen, Mälzereien, bei Stahlwerken, Hochöfen, in der keramischen und Glasindustrie. Für Messungen bis ca. 400° wird das elektrische Widerstandsthermometer benutzt, für Temperaturen von mehr als 400° bis etwa 1600° das thermoelektrische Pyrometer. Ersteres beruht auf der Tatsache, dass sich der Widerstand eines Leiters mit der Temperatur ändert. Der Hauptbestandteil ist ein in eine Metallhülse eingeschlossener Platindraht, dessen elektrischer Temperaturkoeffizient genau bestimmt ist.

Fig. 223.

Für die Messung höherer Temperaturen wird ein Thermoelement, bestehend aus der Kombination einer Platinlegierung (Platinrhodium) mit reinem Platin (Instrument nach Le Chatellier)[1]) benutzt. Zwei lange Drähte aus diesen Metallen werden an einem Ende (*A* in Fig. 223) zusammengeschmolzen und so in den betreffenden Raum eingeführt, dass die Verbindungsstelle der zu messenden Temperatur ausgesetzt ist; die beiden freien Enden, an deren Klemmen K_1, K_2 die Fernleitung angeschlossen wird, müssen sich ausserhalb des betreffenden Raumes und auf gleicher, möglichst niedriger Temperatur befinden. Um die beiden Drähte gegeneinander zu isolieren und sie vor der Einwirkung eventuell auftretender Hochofengase zu schützen, dient eine Armatur aus feuerfestem Material, die aus mehreren von einem festen Metallstab *M* durchsetzten und durch eine Mutterschraube und starke Feder zusammengehaltenen Rohrstücken zusammengesetzt ist. Es wird so das Auseinanderfallen der Rohrstücke verhindert, selbst für den Fall, dass Sprünge entstehen. Für sehr hohe Temperaturen über 1100° ersetzt die Firma Hartmann & Braun den unteren,

1) Für niedere Temperaturen (bis etwa 800°) werden auch Platin-Platinnickel-Elemente benutzt (Hartmann & Braun).

in den Ofen ragenden Teil der Armatur durch ein Platinröhrchen. — Als Anzeigeapparat dient ein empfindliches Galvanometer, das mit einer in Temperaturgrade eingeteilten Skala versehen ist.

4. **Der Peltier-Effekt.** Lötet man zwei verschiedene Metalle — am besten Wismut und Antimon — mit je einem Ende zusammen, und schickt man durch das so erhaltene offene Thermoelement einen elektrischen Strom, so wird die Lötstelle erwärmt oder abgekühlt, je nachdem der Strom vom Wismut zum Antimon fliesst oder umgekehrt. Diese Erscheinung bezeichnet man nach ihrem Entdecker als Peltier-Effekt.

Um den Peltier-Effekt nachzuweisen, bedient man sich am besten des in Figur 224 abgebildeten Apparates nach Schumann. An ein Antimonstäbchen sind an beiden Seiten Wismutstäbchen angelötet. Die beiden Lötstellen befinden sich innerhalb der beiden Kugeln *K* eines Luftthermometers, so dass die Joulesche Wärme in beiden Kugeln in gleicher Weise, der Peltier-Effekt aber in entgegengesetztem Sinne zur Wirkung kommt; die eine Lötstelle kühlt sich ab, die andere erwärmt sich. In der U-förmigen Röhre befindet sich ein Flüssigkeitsfaden.

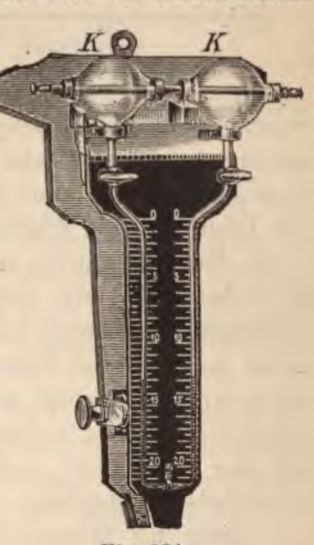


Fig. 224.

5. **Das Hallsche Phänomen.** An dieser Stelle sei eine theoretisch sehr wichtige Erscheinung beschrieben, die besonders stark bei Wismut beobachtet wird.

Wir haben gesehen, dass sich ein stromdurchflossener Leiter (Stromträger) in einem magnetischen Felde unter Umständen bewegt bezw. eine Ablenkung oder Verzerrung erfährt. Es fragt sich, ob auch die Stromfäden selbst (das elektrische Fluidum als solches) ablenkbar sind. Zahlreiche Bemühungen nach dieser Richtung hin blieben erfolglos, bis es Hall (1879)

gelang, das Phänomen in sehr dünnen Metallfolien nachzuweisen.

Führt man einer dünnen, rechteckigen Metallplatte an der Mitte der einen Seite einen Strom zu (Fig. 225), den man bei *B* an der Mitte der gegenüberliegenden Seite wieder abnimmt, so verlaufen die Linien gleichen Potentials ungefähr so, wie es die punktierten Linien anzeigen. Sie haben denselben Verlauf wie die magnetischen Kraftlinien, welche die gesamten Stromfäden umschliessen. Man kann sie bei genügend starkem Strome durch Eisenfeilicht sichtbar machen. Verbindet man *C* und *D*, die Mitten der Längsseiten, mit einem empfindlichen Galvanoskop, so erhält man keinen Strom, weil die Plattenpunkte *C* und *D* gleiches Potential haben. Bringt man aber die Metallplatte so in ein starkes, homogenes magnetisches Feld, dass die Kraftlinien senkrecht zur Oberfläche der Platte stehen, so zeigt das Galvanometer einen dauernden Strom an[1]. Kehrt man den Hauptstrom um, so kehrt sich auch der Zweigstrom um. Man muss also schliessen, dass durch die magnetische Kraft die Äquipotentiallinien gedreht oder verzerrt werden, so dass a auf einer Linie höheren, b auf einer solchen niederen Potentials oder umgekehrt zu liegen kommt. Die Stärke der Drehung wächst mit der Stromstärke J und der Feldstärke, variiert aber bei verschiedenen Metallen.

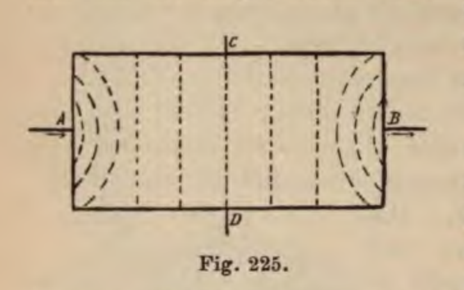


Fig. 225.

Diese bei Wismut am stärksten auftretende Erscheinung ist mit einem eigentümlichen Verhalten der Widerstandsvergrösserung[2] im magnetischen Felde in Verbindung gebracht

1) Man schliesst zuerst den Hauptstrom, dann die Zweigleitung, damit man in der Galvanometerleitung nicht einen Induktionsstrom erhält.

2) Zu den sogenannten Wismuteffekten gehört auch die Änderung des thermischen Leitvermögens (Verringerung des Wärmeleitungsvermögens) im Magnetfelde.

und letztere nur als scheinbar aufgefasst worden; man nimmt an, dass eine elektromotorische Gegenkraft infolge Verzerrung oder Verdrehung der Stromfäden ins Leben gerufen wird.

„Dass überhaupt Kraftlinien, die senkrecht zu dem System der Stromlinien stehen, so dass in Bezug auf die Kraftlinienrichtung ringsherum alles symmetrisch ist, eine einseitige Drehung hervorzubringen vermögen, zeigt, dass in den Kraftlinien ein Vorgang sich abspielen muss, der notwendig selbst schon von der Art einer Drehung ist". (H. Ebert, Theorie des Elektromagnetismus. Hdbuch der Elektrotechnik I. 3, S. 55.)

Einundzwanzigstes Kapitel.

Elektrische Messinstrumente und Messmethoden [1].

1. **Messung der Stromstärke.** Um festzustellen, wie stark ein elektrischer Strom ist, misst man entweder die chemischen oder die thermischen Wirkungen, oder man misst die Stärke des Antriebes, den Eisen bezw. ein Magnet durch den Strom oder der Strom durch Magnete erfährt (elektromagnetischer Bewegungsantrieb).

a) Voltametrische Strommessung. Wie wir gesehen haben, sind die chemischen Wirkungen des elektrischen (Gleich-) Stromes proportional der Elektrizitätsmenge, die durch einen Elektrolyten hindurchgeht. Ist die Stromstärke konstant, so ist die Gewichtsmenge des in einer bestimmten Zeit an einer Elektrode frei gewordenen Bestandteiles der Stromstärke direkt proportional. Als Beispiel wählen wir die Elektrolyse

1) Das Gebiet, mit dem wir es in diesem Kapitel zu tun haben, ist ein derartig umfangreiches, dass nur in einem grossen Spezialwerke alles das geboten werden kann, was durch die gemeinsame Arbeit der Theoretiker und Praktiker geschaffen worden ist.

der verdünnten Schwefelsäure. Man erhält, wenn sich keine Nebenprodukte bilden (s. S. 226), durch einen Strom von 1 Amp. in 1 Minute 10,44 cm³ Knallgas von 0° und 760 mm Druck; in diesem sind 6,96 cm³ Wasserstoff und 3,48 cm³ Sauerstoff. Finden wir also, dass durch einen konstanten Strom in 5 Minuten a cm³ Knallgas entwickelt werden, so ist die Stromstärke gleich $\frac{a}{5 \cdot 10,44}$ Amp.

Bei den Wasservoltametern verwendet man verdünnte Schwefelsäure von etwa 20% (4 g Wasser + 1 g konzentrierte Schwefelsäure, spezif. Gew. etwa 1,14); als Elektroden dienen blanke Platinbleche. Bei stärkeren Strömen misst man das Volumen des entwickelten Knallgases, bei schwächeren dasjenige des Wasserstoffs allein, um die aus der stärkeren Absorption und der teilweisen Ozonisierung des Sauerstoffs entstehenden Fehler zu vermeiden[1]).

Das Silbervoltameter wird namentlich zur genauen Messung von schwächeren Strömen — bis zu etwa 0,5 Amp. — benutzt. Als Elektrolyt verwendet man 20-prozentige Silbernitratlösung (möglichst frisch), als Kathode einen Platintiegel, in den als Anode ein Stift aus reinem Silber eintaucht.

Durch 1 Amp. werden in 1 Sekunde 1,118 mg Silber abgeschieden. Die Messung erfolgt durch Wägung des auf der Kathode gebildeten Silberniederschlages.

Endlich findet noch das Kupfervoltameter Verwendung. Die Stromstärke wird aus der Gewichtsmenge des Kupfers berechnet, das aus einer gesättigten Lösung von reinem Kupfervitriol in destilliertem Wasser abgeschieden wird (0,329 mg pro Amperesekunde). Als Kathode dient ein Platinblech (oder Kupferblech), als Anode ein U-förmig gebogenes Blech aus reinem Kupfer, das die Kathode umschliesst, so dass beide Seiten derselben ausgenutzt werden.

Die voltametrische Methode wird in der Praxis nur dann benutzt, wenn es sich um die Eichung von Strommessern handelt.

---

1) Näheres über die voltametrische Strommessung s. Hdbuch der Elektrotechnik II, 1.

b) Elektromagnetische Strommesser[1]. α) Strommesser mit beweglichem Magnet oder Eisenkörper. Zu diesen gehört die Tangentenbussole. Befindet sich im Mittelpunkte eines grossen kreisförmigen Leiters eine sehr kurze Magnetnadel, so kann man die Kräfte, die die einzelnen (gleich grossen) Stromelemente auf die Pole ausüben, einander gleichsetzen und leicht summieren. Auf jeden Pol wirkt ausser dem Kreisstrom noch der Erdmagnetismus, und man kann sich die beiden vorhandenen Kräfte durch eine einzige ersetzt denken. Wird der Kreisstrom so aufgestellt, dass seine Ebene vertikal ist (s. Fig. 226) und in den magnetischen Meridian[2] fällt, ruht ferner die Nadel wie bei einem Kompass auf einer im Mittelpunkte des Kreisstromes stehenden Spitze, so wird sie unter der Einwirkung des Erdmagnetismus[3] und des Stromes eine mittlere Stellung einnehmen, sie dreht sich so lange, bis ihre Achse mit der Richtung der Resultierenden zusammenfällt. Nennt man den Winkel, um den die Nadel durch den Strom J abgelenkt wird, α, so ist



Fig. 226.

$$J = C . \tan \alpha.$$

Der Faktor, mit dem man tang α multiplizieren muss, um die Stromstärke zu erhalten, ist für jedes Instrument ein anderer und wird Reduktionsfaktor genannt[4]. Das Multiplizieren ge-

1) Über Galvanoskope siehe Kapitel 7 S. 86.

2) Darunter versteht man eine vertikale Ebene, die durch eine (ruhende) Kompassnadel gelegt wird.

3) Es kommt nur die Horizontalkomponente der erdmagnetischen Kraft in Betracht.

4) Der Reduktionsfaktor hat den Wert $\frac{r . H}{2 \pi}$, wenn H die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus ist und r der Radius des Stromleiters;

schieht am einfachsten in der Weise, dass man die Tangentenbussole mit einem Voltameter in Reihe schaltet und mittels des letzteren J misst. Da man α auf der Skala der Bussole ablesen kann, so ist in der Gleichung $J = C . \text{tang}\ \alpha$ nur C unbekannt. Um den Drehungswinkel der kleinen Magnetnadel besser ablesen zu können, wird ein langer Aluminiumzeiger mit zugespitzten Enden rechtwinklig zur magnetischen Achse der Nadel befestigt.

Für starke Ströme benutzt man als Stromleiter einen einfachen Ring aus Rundkupfer (*M* in Fig. 226), der aufgeschnitten wird und dessen Enden mit Klemmschrauben verbunden werden; für schwache Ströme dient ein Multiplikator, d. h. statt den Strom nur einmal herumzuführen, geschieht dies in vielen Windungen.

Apparate, die für den technischen Gebrauch bestimmt sind und eine direkte Messung (Ablesung) der Stromstärke ge-

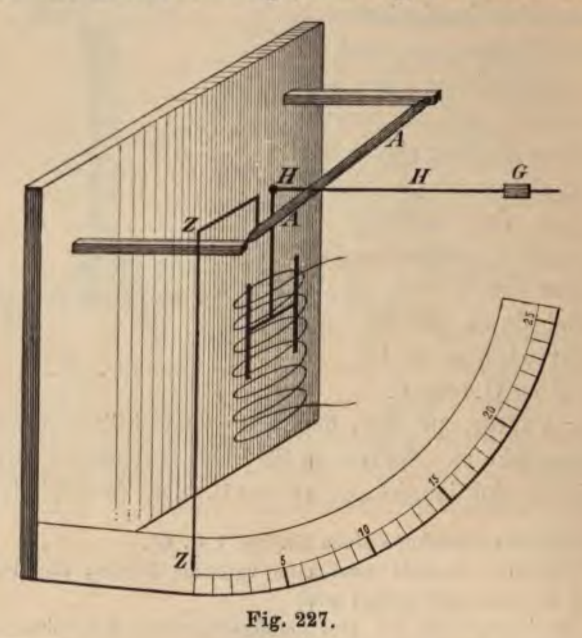


Fig. 227.

---

wenn man J in Amp. ausdrücken will, ist noch mit 10 zu multiplizieren. Fliesst der Strom n-mal um die Nadel herum, so muss man den Bruch durch n dividieren.

statten, bezeichnet man als Amperemeter. Von Messinstrumenten, bei denen ein durch den Strom elektromagnetisch erregter weicher Eisenkörper beweglich angeordnet ist, seien folgende erwähnt (Weicheiseninstrumente). In Fig. 227 besteht der Eisenkörper aus zwei zu einem *H* verbundenen Eisenstäbchen, die z. T. in eine Drahtspirale aus einer geringen Anzahl von Windungen eintauchen. Der Hebel *H* ist mit der leicht drehbaren Achse *A* fest verbunden, *G* ist ein Gegengewicht. Fliesst Strom durch die Spule, so werden die Eisenstäbchen in das Innere der Spule hineingezogen, die Achse *A* dreht sich und mit ihr der Zeiger *Z*. Die Skala wird empirisch (durch Eichung, Vergleich mit einem gleichzeitig eingeschalteten Präzisionsinstrument) hergestellt.

In Fig. 228 sind die Hauptteile eines elektromagnetischen Demonstrations-Instrumentes mit Luftdämpfung von Hart-



Fig. 228.

mann & Braun abgebildet. Im Hohlraume der fest angeordneten Spule ist ein konzentrisches Cylindermantelsegment aus weichem Eisen mit einer in Steinen gelagerten Achse drehbar angeordnet. Diesem gegenüber ist mit kleinem Abstande ein ähnlicher Weicheisenkörper fest angeordnet (*a* in Fig. 229). Fliesst durch die Spule Strom, so werden beide Eisenkörper in gleichem Sinne polarisiert und wirken abstossend aufeinander; der beweglich angeordnete Teil dreht sich also, gleichzeitig auch der auf seiner Achse befestigte Zeiger.



Fig. 229.

Damit der Zeiger möglichst schnell (ohne zu pendeln) nach Stromschluss bezw. nach einer Änderung der Stromstärke zur Ruhe kommt, ist die Luftdämpfung angebracht (aperiodisches Messinstrument). Diese besteht aus einem Z-förmigen leichten Dämpferflügel, der an einem sehr kurzen, dem Zeiger entgegengesetzt gerichteten Arme befestigt ist, und einer geschlossenen bogenförmigen Kammer. Durch die Reibung zwischen dem Flügel und der Luft in der Kapsel werden die Schwingungen fast gänzlich unterdrückt.

β) Elektromagnetische Strommesser mit beweglicher Spule — Drehspuleninstrumente[1]). Sie beruhen darauf, dass eine ebene Spule (Rahmen mit Windungen), in der ein Strom fliesst, in einem (homogenen) magnetischen Felde ein Drehungsmoment (einen Bewegungsantrieb) erfährt. Das magnetische Feld erzeugt man durch permanente Magnete aus gut gehärtetem Wolframstahl. Meist erhält das Feld durch geeignete Polschuhe aus weichem Eisen (*P* in Fig. 230) eine geeignete Form.

Die Einrichtung eines solchen Instrumentes soll an der

1) Eine wertvolle Eigenschaft der Drehspuleninstrumente ist ihre Unempfindlichkeit gegen magnetische Störungen (Eisen, das sich in der Nähe befindet, Ströme die vorbeifliessen). Diese Instrumente wurden 1890 von Weston auf den Markt gebracht, werden aber seit einer Reihe von Jahren auch von deutschen Firmen in vorzüglicher Ausführung gebaut. Man nennt sie auch Strommesser nach Deprez-d'Arsonval.

Hand der Fig. 230 erläutert werden. An den Polen des Stahlmagnets *M* sind Polschuhe befestigt, die auf der Innenseite cylindrisch ausgedreht sind. In dem hierdurch gebildeten Hohlraume befindet sich ein Cylinder *E* aus weichem Eisen.

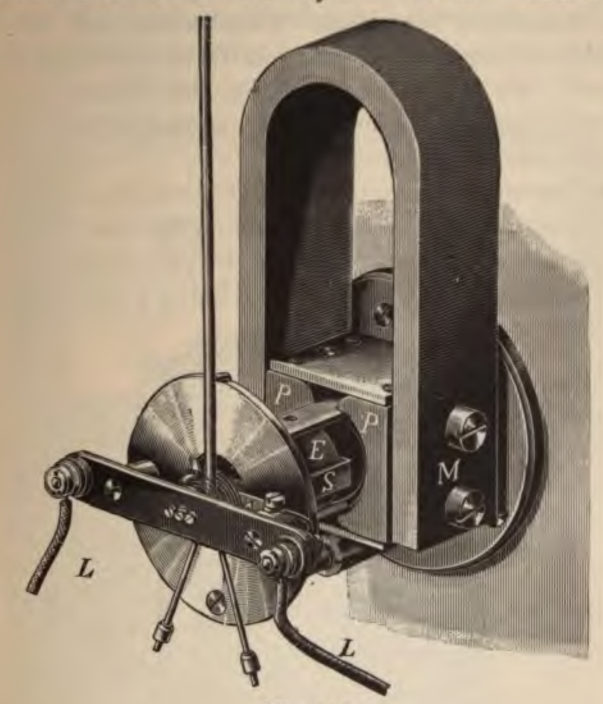


Fig. 230.

Durch diese Anordnung wird erreicht, dass das magnetische Feld im ganzen Luftzwischenraume überall gleiche Stärke hat. Der bewegliche Teil besteht aus einem leichten, rechteckigen Rahmen *S* aus Aluminium, auf den ein sehr dünner Draht gewickelt ist. Durch zwei übereinanderliegende Spiralfedern, die einerseits mit den Klemmen des Apparates, anderseits mit den Enden des Spulendrahtes in Verbindung stehen, wird der Spule der Strom zugeführt. Die Spule ist mittels feiner Zapfen in Steinlöchern gelagert und erhält durch die Spiralfedern ihre Richtkraft (Gegenkraft). Fliesst durch die Spule ein Strom, so dreht sie sich so lange, bis die auf sie wirkende elektro-

magnetische Kraft durch die Gegenkraft der Federn, deren Spannung mit dem Drehungswinkel wächst, kompensiert wird.

Wenn sich die Spule dreht, so entstehen in dem Aluminiumrahmen elektrische Ströme, da er die Kraftlinien des Magnetsystems schneidet. Die Ströme (Wirbelströme, s. S. 118) haben eine solche Richtung, dass durch die Wechselwirkung zwischen ihnen und den Polen die Bewegung des Rahmens gehemmt wird (elektrische Dämpfung) und die Zeigereinstellung eine fast vollkommen aperiodische ist.

Das ganze Instrument, das für Demonstrationszwecke vorzüglich geeignet ist, und einen Strom von etwa 0,0001 Amp. noch deutlich anzeigt, ist in Figur 231 abgebildet. Es kann als Galvanoskop (zweite und fünfte Klemme), als Amperemeter



1:5
Fig. 231.

(erste und letzte Klemme, der Strom teilt sich, es fliesst nur ein kleiner Bruchteil durch die bewegliche Spule) und als Voltmeter benutzt werden. (Im letzten Falle ist vor die bewegliche Spule ein Vorschaltwiderstand zu legen; dieser ist auf der Mitte des Grundbrettes als Spule befestigt.)

Über die Strommessung mittels Elektrodynamometers wurde

früher schon berichtet (s. S. 108). Dieses wird besonders bei Wechselstrommessungen benutzt.

c) Hitzdrahtinstrumente. Bei diesen wird die thermische Wirkung des elektrischen Stromes benutzt. Die ersten auf diesem Prinzip beruhenden Instrumente wurden von Cardew konstruiert. Die Einrichtung, welche die Firma Hartmann und Braun den Apparaten gegeben hat, ist folgende:

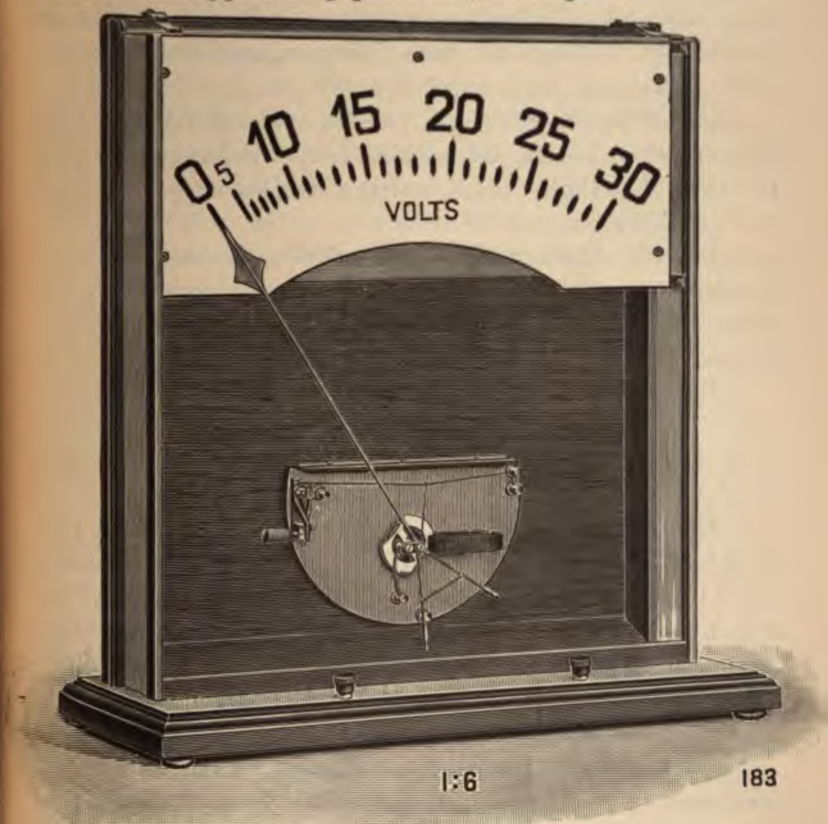


Fig. 232.

Ein dünner Platinsilberdraht (der horizontale Draht in Fig. 232[1]) ist an den Enden fest eingeklemmt; ein feiner

1) Das hier abgebildete Instrument ist zwar auf Spannung geeicht, jedoch ist die Einrichtung der Amperemeter genau dieselbe.

Messingdraht ist in der Mitte des Hitzdrahtes angeknüpft, das Ende ist an einer von der Grundplatte isolierten kleinen Säule befestigt. In der Mitte dieses Drahtes greift ein über eine kleine Rolle geschlungener Kokonfaden an, der durch eine Feder gespannt gehalten wird. Auf der Rolle ist der Zeiger befestigt. Fliesst Strom durch den Hitzdraht, so erwärmt er sich, er dehnt sich aus; der Punkt, an dem der Messingdraht befestigt ist, senkt sich; infolgedessen weicht der Punkt, an dem der Kokonfaden befestigt ist, nach links aus, und die Zeigerrolle dreht sich.

Um eine Dämpfung zu erzielen, ist auf der Achse des Zeigers eine leichte Aluminiumscheibe befestigt, die sich zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagnets bewegt (s. Fig. 232).

Da die Erwärmung des Platinsilberdrahtes von dem Quadrate der Stromstärke abhängig ist, so kann das Instrument sowohl für Gleichstrom- wie für Wechselstrommessungen benutzt werden.

Der dünne Hitzdraht kann nur schwache Ströme vertragen; handelt es sich um die Messung von starken Strömen, so bedient man sich einer Stromverzweigung, man erreicht so eine

Erweiterung des Messbereiches bei Amperemetern. Angenommen, der Widerstand eines Amperemeters sei 0,1 Ohm und die grösste zulässige Stromstärke 10 Amp. Sollen mit diesem Instrumente Ströme bis zu 50 Amp. gemessen werden, so schaltet man parallel zu seiner Spule einen Widerstand, der so bemessen ist, dass von 50 Amp. nur 10 durch die Spule, 40 Amp. also durch den Nebenschluss gehen. Um den Widerstand des Nebenschlusses zu erhalten, schliessen wir folgendermaßen. Der Spannungsverlust im Apparate selbst ist bei voller Belastung $0{,}1 . 10 = 1$ Volt; gerade so gross muss der Spannungsverlust im Nebenschlusse (Shunt) sein. Nennen wir also den zu berechnenden Widerstand x, so muss $x . 40 = 1$ oder $x = {}^1/_{40}$ Ohm sein.

Schalten wir also parallel zu dem Instrumente einen Widerstand von ${}^1/_{40}$ Ohm, und lesen wir bei einer Messung

auf der Skala 6 Amp. ab, so ist der ganze Strom gleich 5.6 = 30 Amp.

2. **Messung der Spannung.** Zwischen den Strom- und Spannungsmessern besteht i. A. ein prinzipieller Unterschied nicht. Während aber bei den Amperemetern der Widerstand sehr klein ist (bezw. sein sollte), haben die Voltmeter einen relativ grossen Widerstand. Die Voltmeter müssen daher, auch wenn nur schwache Ströme durch sie fliessen, einen grösseren Ausschlag zeigen [1]).

Angenommen, ein Messinstrument sei so eingerichtet, dass durch einen schwachen Strom, sagen wir durch 0,01 Amp., eine deutliche Zeigerablenkung herbeigeführt wird. Hat das Instrument einen Widerstand von 1000 Ohm, so beträgt der Spannungsverlust in ihm oder seine Klemmenspannung bei der angenommenen Stromstärke $0{,}01 \times 1000 = 10$ Volt. Verbinden wir umgekehrt die Klemmen des Instrumentes mit einer Stromquelle, deren Klemmenspannung 10 Volt beträgt, durch zwei Drähte, deren Widerstand wir im Vergleich zu 1000 Ohm vernachlässigen dürfen, so fliesst ein Strom von 0,01 Amp. durch den Apparat.

An die Stelle der Skala, wo der Zeiger steht, schreiben wir bei der Eichung 10 Volt oder kurz 10. Wird das Instrument mit einer Stromquelle von 20 Volt Spannung verbunden, so erleidet der Zeiger eine grössere Ablenkung wie eben, da jetzt ein Strom von 0,02 Amp. durch den Apparat fliesst. Die Ablenkung wird durch einen Strich auf der Skala markiert und neben diesen die Zahl 20 geschrieben. Man notiert also auf der Skala diejenigen Zahlen, die der Klemmenspannung des Apparates entsprechen (w. i.).

Soll der Messbereich eines Spannungsmessers vergrössert werden, so kann man entweder, wie bei den Strommessern, eine Teilung des Stromes vornehmen oder einen Widerstand

---

1) Das Voltmeter braucht deshalb nicht „empfindlicher" zu sein. Bei den elektromagnetischen Instrumenten ist die Amperewindungszahl der Spule maßgebend; bei den Amperemetern ist die Windungszahl klein und der Strom relativ gross, bei den Voltmetern ist die Windungszahl gross und der Strom klein.

vorschalten. In der Praxis benutzt man fast ausschliesslich das letztere Mittel. Ein Beispiel dürfte genügen, das Prinzip zu erklären. Der Messbereich eines Voltmeters erstrecke sich bis 100 Volt, sein Widerstand betrage 1000 Ohm. Schalten wir noch einen Widerstand von 1000 Ohm hinzu, indem wir eine Klemme des Voltmeters mit einer Klemme des neuen Widerstandes verbinden, so können wir Spannungen bis zu 200 Volt messen. Denn verbinden wir die freie Klemme des Voltmeters und die freie Klemme des Vorschaltwiderstandes mit einer Stromquelle oder mit den Leitungen eines Netzes, und beträgt die Spannung 200 Volt, so fliesst durch das Voltmeter ein Strom von $\frac{200}{2000} = 0{,}1$ Amp. Dieser Strom bewirkt dieselbe Ablenkung des Zeigers, wie wenn wir, ohne den Vorschaltwiderstand zu benutzen, das Voltmeter mit einer Stromquelle von 100 Volt verbinden. Wir müssen also die abgelesene Spannung (100 Volt) mit 2 multiplizieren, um die zu messende zu erhalten.

Bei den elektrostatischen Voltmetern verwendet man eine oder mehrere feststehende Metallplatten und eine oder mehrere drehbar angeordnete Platten oder Scheiben. Das eine System wird mit dem positiven Pole der Stromquelle, das andere mit dem negativen Pole verbunden oder umgekehrt. Das bewegliche System wird von dem festen angezogen und führt eine Drehung aus, die auf einen Zeiger übertragen wird[1]).

Bei der Benutzung des Voltmeters ist zu beachten, dass dieses im Nebenschlusse liegen muss. Man vergleiche Fig. 130 Seite 224.

Messung der elektromotorischen Kraft eines galvanischen Elementes. In den meisten Fällen genügt es, das Element, dessen elektromotorische Kraft gemessen werden soll, mit einem Voltmeter für geringe Spannungen, das einen grossen inneren Widerstand hat, zu verbinden. Wenn es sich aber um sehr genaue Messungen handelt, so ist

---

1) Hier wären auch die Elektrometer zu erwähnen, von deren Beschreibung aber abgesehen werden soll.

diese Methode nicht anwendbar. Denn in Wirklichkeit misst man nicht bei diesem Verfahren die elektromotorische Kraft, sondern die Klemmenspannung; beide Grössen differieren um den Betrag $w_i \cdot i$., wenn w_i der innere Widerstand der Stromquelle und i der Messstrom ist. Hierzu kommt noch der Fehler, der durch eine event. Polarisation verursacht wird. Am einwandfreiesten ist die Messung nach der Kompensationsmethode, die zuerst 1841 von Poggendorff verwendet wurde; bei dieser wird die elektromotorische Kraft bestimmt, ohne dass das Element Strom abgibt.

Das Prinzip ist folgendes: es sei *B* in Fig. 233 eine Batterie von möglichst konstanter und genügend hoher elektromotorischer Kraft (2 Akkumulatoren genügen), *W* ein Widerstand von 4000 Ohm, *ac* ein Widerstand von 6000 Ohm, *X* ein Normalelement (s. S. 233), dessen elektromotorische Kraft E_n man genau kennt. Die Batterie gibt, wenn durch den Nebenschluss *d G a* kein Strom fliesst, einen

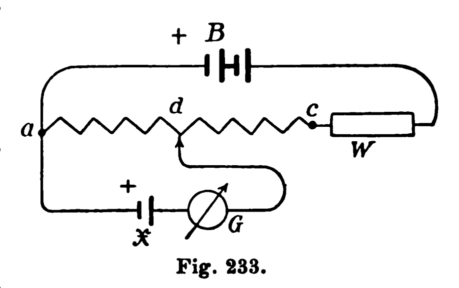


Fig. 233.

Strom von $\frac{E}{10000}$ Amp. ab, wo E ihre elektromotorische Kraft ist (angenähert 4 Volt). Der Spannungsverlust in *ac* beträgt mithin $\frac{6000 \cdot E}{10000} = \frac{3}{5}$ E Volt (angenähert 2,4 Volt). Da auf jeden Fall die elektromotorische Kraft des Normalelementes kleiner ist als $\frac{3}{5}$ E, so gibt es zwischen *a* und *c* einen Punkt *d*, so dass der Spannungsabfall in *ad* gleich ist E_n. Hat man diesen Punkt gefunden, so fliesst durch das Galvanoskop *G* kein Strom[1]). Der Widerstand zwischen *a* und *d* betrage W_n Ohm; dann ist $E_n = W_n \cdot \frac{E}{10000}$.

1) Die elektromotorische Kraft von x wird kompensiert durch die entgegengesetzt gerichtete Spannung zwischen den Punkten *a* und *d*.

Jetzt wird das Normalelement ersetzt durch die Stromquelle, deren elektromotorische Kraft *X* gemessen werden soll; man sucht wieder einen Punkt zwischen *a* und *c*, so dass *G* stromlos ist; dieser sei *d'*. Liegt zwischen *a* und *d'* ein Widerstand von W_x Ohm, so ist $X = W_x \cdot \frac{E}{10000}$. Dividiert man die beiden Gleichungen, so ergibt sich

$$X = E_n \cdot \frac{W_x}{W_n}.$$

Zwischen den Punkten *a* und *c* muss ein grosser Widerstand liegen, damit es ausgeschlossen ist, dass das Normalelement einen zu starken Strom abgibt. Dadurch, dass man auch für *W* einen Widerstand von mehreren Tausend Ohm nimmt, wird der Spannungsabfall in *ac* der zu messenden elektromotorischen Kraft genähert, ferner wird erreicht, dass vor der Kompensierung von E_n nur ein ganz schwacher Strom in das Normalelement fliessen kann.

3. **Messung des Leitungswiderstandes.** a) Substitutionsmethode (bereits 1826 von Ohm angewandt). Man schaltet eine Batterie von möglichst konstanter elektromotorischer Kraft (Akkumulatoren), einen Rheostaten, den zu messenden Widerstand X und einen Strommesser in Reihe und reguliert den Rheostaten so, dass am Strommesser ein passender Ausschlag entsteht. Der Strom betrage J Amp. Hierauf schliesst man durch einen dicken Draht den Widerstand X kurz und schaltet dann vom Rheostaten soviel Widerstand hinzu, dass wieder der Strom J entsteht. Dann muss natürlich X dem hinzugeschalteten Widerstand gleich sein — vorausgesetzt, dass die elektromotorische Kraft E der Batterie unverändert geblieben ist[1]).

b) Methode des direkten Ausschlags. Man schaltet eine Stromquelle, deren elektromotorische Kraft E Volt betrage, ein Galvanometer und einen passend gewählten Zusatzwiderstand in Reihe. Ist W der Widerstand im Stromkreise (inkl.

---

1) Diese Methode ist namentlich für die Messung grosser Widerstände geeignet, wobei man der Batterie nur schwache Ströme entnimmt.

Galvanometer), so ist $J_1 = \frac{E}{W}$. Jetzt fügt man den zu messenden Widerstand X hinzu; der neue Strom sei J_2:

$$J_2 = \frac{E}{W + X}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen kann man W und X berechnen.

c) Widerstandsmessung durch Strom und Spannung. Man schickt durch den unbekannten Widerstand einen Strom von der Stärke J und misst die Spannung e an den Enden des Widerstandes. Dann findet man x aus der Gleichung $e = J \cdot x$.

Der durch das Amperemeter fliessende Strom ist grösser als J, wenn man die Spannung mittels eines stromverbrauchenden Instrumentes (Voltmeters) bestimmt; benutzt man für die Spannungsmessung ein Galvanometer von grösserem Widerstand, der event. durch einen vorgeschalteten Rheostaten noch vergrössert wird (Spannungsgalvanometer), so kann man meistens den durch den Nebenschluss fliessenden Strom vernachlässigen. Ist das Galvanometer nicht auf Spannung geeicht, so hat man die Gleichung zu benutzen $x\,(J - i) = r\,i$, wo J der gemessene Hauptstrom, i der Galvanometerstrom, r der Widerstand im Galvanometer ist.

d) Mittels des Voltmeters kann man besonders grosse Widerstände ziemlich genau messen, wenn man den Widerstand des Voltmeters kennt. Dieser sei r. Man verbindet zuerst das Voltmeter mit den Klemmen einer Batterie; die gemessene Spannung sei E_1; dann ist der durch das Voltmeter fliessende Strom $i_1 = \frac{E_1}{r}$. Jetzt schaltet man den Widerstand x zwischen Batterie und Voltmeter; man liest eine kleinere Spannung ab als eben, sie sei E_2. Der zugehörige Strom ist $i_2 = \frac{E_2}{r}$[1]. Es ist aber auch $i_2 = \frac{E_1}{x + r}$. Für die Bestimmung von x gilt also die Gleichung

$$\frac{E_2}{r} = \frac{E_1}{x + r}.$$

---

1) Das Voltmeter zeigt die an seinen Klemmen herrschende Spannung an, und diese ist $i_2 \cdot r$.

e) Widerstandsmessung mit dem Differentialgalvanometer. Das Differentialgalvanometer ist ein Galvanometer mit zwei Spulen von gleichem Widerstande, die bei gleicher Stromstärke gleich stark auf eine Magnetnadel einwirken. Schliesst man ein und dasselbe Element nach Vorschaltung gleicher Widerstände durch beide Spulen, und richtet man es so ein, dass der Strom der einen Spule die Nadel im entgegengesetzten Sinne beeinflusst wie derjenige der anderen Spule, so erhält man keinen Ausschlag. Hierauf schaltet man in den einen Stromkreis den zu messenden Widerstand, in den anderen einen Rheostaten und richtet es so ein (durch Veränderung des Rheostatwiderstandes), dass die Nadel nicht ausschlägt; dann ist der eingeschaltete Teil des Rheostats gleich dem unbekannten Widerstande.

f) Die Wheatstonesche Brücke. Diese wurde im Kapitel 5 beschrieben. Die Brückenmethode ist nicht anwendbar, wenn es sich um die Messung eines kleinen Widerstandes handelt, weil dann die Übergangswiderstände (Widerstände an den Verbindungsstellen) und die Widerstände in den Zuleitungsdrähten einen grossen Einfluss auf das Resultat ausüben. Man benutzt in solchen Fällen die Thomsonsche Brücke, von deren Beschreibung jedoch abgesehen werden soll.

Der Leitungswiderstand von Elektrolyten kann wegen der Polarisation[1]) (s. S. 223) mit Gleichstrom nicht nach einer der beschriebenen Methoden gemessen werden. Die Polarisation fällt fort, wenn man durch den Elektrolyten Wechselstrom schickt.

---

1) Die Polarisation ist keine konstante Grösse, sie ändert sich mit der Stromdichte. Man kann dies z. B. für verdünnte Schwefelsäure folgendermaßen nachweisen. Man messe bei verschiedenen Stromstärken i_1, i_2, i_3 die Klemmenspannung des elektrolytischen Apparates. Unter der Annahme, dass die Polarisation konstant sei, berechne man aus je zweien der Gleichungen

$$i_1 = \frac{e_1 - e}{w}, \quad i_2 = \frac{e_2 - e}{w}, \quad i_3 = \frac{e_3 - e}{w},$$

wo e die elektromotorische Kraft der Polarisation sei, den Widerstand w des elektrolytischen Apparates; man erhält dann verschiedene Werte für w.

Bei der Elektrolyse der verdünnten Schwefelsäure z. B. entsteht während der einen Periodenhälfte an der Elektrode E_1 Wasserstoff, während der folgenden Sauerstoff. Letzterer verbindet sich mit etwa noch vorhandenem Wasserstoff zu H_2O; oder man kann annehmen, dass die Elektrode E_1 beide Gase in gelöstem Zustande enthält (Absorption, Okklusion), so dass zwei entgegengesetzt wirkende Polarisationsspannungen vorhanden sind, die sich aufheben.

Den Widerstand eines Elektrolyts sowie den von galvanischen Elementen kann man mittels der Wheatstoneschen Brückenanordnung folgendermaßen bestimmen. Für w_1 (siehe Fig. 35 S. 74) wählt man einen induktionsfreien Widerstand, den vierten Widerstand x bildet die elektrolytische Zelle. Die Ecken *A* und *B* verbindet man mit einer Wechselstromquelle oder mit den sekundären Klemmen eines kleinen Induktionsapparates, das Galvanoskop *G* endlich ersetzt man durch ein Telephon. Aus Gründen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, gelingt es nicht, zu erreichen, dass man im Telephon keinen Ton wahrnimmt; man reguliert auf Tonminimum.

Wenn der Widerstand in der elektrolytischen Zelle nur ein geringer ist, wie es z. B. bei Akkumulatoren der Fall ist, so liefert diese Methode wegen der Übergangswiderstände keine genauen Resultate. Man wendet dann die Brückenschaltung nach Hockin und Mathiesen an, welche die Übergangswiderstände an den Klemmen zu eliminieren gestattet. Soll der Widerstand bei gleichzeitiger Stromabgabe seitens des Elementes ermittelt werden, der in der Regel von dem der offenen Zelle wesentlich verschieden ist, so bedient man sich der Methode von Uppenborn[1]) oder des von Nernst und Haagn[2]) ausgearbeiteten Verfahrens.

4. **Messung des Effektes.** Bei Gleichstrom bestimmt man fast ausschliesslich die Leistung einer Stromquelle (Arbeit pro Sekunde) oder den von einem Apparate verbrauchten Effekt durch eine Strom- und eine Spannungsmessung, wobei natürlich das Voltmeter mit den Klemmen der Stromquelle bezw. des stromverbrauchenden Apparates (Lampe, Elektromotor etc.) verbunden werden muss. Statt dessen kann man die Messung mittels des Wattmeters vornehmen (s. S. 108).

---

1) Siehe Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker.

2) Zeitschr. für physik. Chemie 1894, S. 623.

Die Leistung eines Wechselstromes ist nur dann gleich dem Produkte aus der gemessenen (effektiven) Stromstärke und der effektiven Spannung, wenn keine Phasenverschiebung stattfindet. Ist der Strom gegen die Spannung verschoben, so muss man ausser den Effektivwerten von Strom und Spannung noch den Phasenverschiebungswinkel φ kennen, da die wirkliche Leistung gleich ist $e.i.\cos\varphi$. Eine direkte Bestimmung des Wechselstromeffektes lässt sich mit Hülfe des Wattmeters ausführen. Dieses Instrument wurde bereits in Kapitel 8 beschrieben und seine Verwendung besprochen. Es erübrigt noch, auf den Fall einzugehen, dass durch die beiden Spulen Wechselströme fliessen. Der durch die Hauptstromspule fliessende Strom zur Zeit t sei J und der durch die dünndrähtige Spule (Spannungsspule) fliessende Strom i; dann ist das Drehungsmoment[1]) proportional J.i. Ändert sich in einem der beiden Stromkreise die Stromrichtung, so ändert sich der Drehungssinn der beweglichen Spule. Kehrt sich aber in beiden Kreisen die Stromrichtung um, so bleibt der Drehungssinn derselbe. Fliessen also durch die beiden Spulen Wechselströme, die in der Phase übereinstimmen, so addieren sich die den einzelnen Zeitteilchen entsprechenden Drehungsmomente zu einem resultierenden Drehungsmomente.

Bei Phasenverschiebung kehrt sich nicht in beiden Spulen zur selben Zeit die Stromrichtung um, sondern in der einen Spule etwas später als in der anderen, und zwar beträgt der betreffende Zeitunterschied $\frac{\varphi}{360}.T$ Sekunden, wenn φ der Phasenverschiebungswinkel und T die Periode ist. Die während dieser Zeit vorhandenen elektrodynamischen Kräfte wirken hemmend auf die Bewegung der drehbar angeordneten Spule, die Ablenkung wird kleiner, als wenn keine Phasenverschiebung vorhanden wäre. Wir sehen also, dass die Phasenverschiebung bei dem Wattmeter ihren Einfluss geltend macht; die Angabe

1) Unter Drehungsmoment versteht man das Produkt aus der Länge des Hebelarmes und der am Ende des Hebelarmes senkrecht zu ihm wirkenden Kraftkomponente.

des Wattmeters ist dem Ausdrucke E.J.cos φ, d. h. dem Effekte des Wechselstromes proportional.

Das früher beschriebene Wattmeter gehört zu den Torsionsinstrumenten. Bequemer sind die Wattmeter für direkte Ablesung. Die Spannungsspule wird auf einer Achse aus Stahl befestigt, deren feine, gut gehärtete Spitzen auf harten Edelsteinen gelagert sind (Verringerung des Reibungswiderstandes). Ausser der Spule trägt die Achse die beiden Zuführungsfedern, die gleichzeitig als Richtkraft dienen (vgl. S. 409). Vor die Spannungsspule wird ein grosser Widerstand gelegt, der für Spannungen bis etwa 150 Volt im Instrumentgehäuse selbst untergebracht wird.

Bei der Leistungsmessung eines Drehstromes sind verschiedene Fälle zu unterscheiden: a) Sind die drei Phasen gleich stark belastet, so erhält man die Leistung des ganzen Systems, indem man die Leistung in einer Phase ermittelt. Ist ein Nullleiter vorhanden, so schaltet man die Stromspule in einen Hauptleiter ein und verbindet die Spannungsspule mit dieser Leitung und mit dem Nullleiter. Die Angabe des Wattmeters ist mit 3 zu multiplizieren. b) Für jede beliebige Belastung der drei Phasen kann, wenn kein Nullleiter existiert, die Messung der Gesamtleistung immer mit zwei gleichen Einphasen-Wattmetern erfolgen. Nennen wir die drei Leitungen L_1, L_2, L_3. Die Hauptstromspulen werden in die Leitungen L_1 und L_3 (oder L_1 und L_2 oder in L_2 und L_3) eingeschaltet; die Spannungsspulen werden mit L_1 und L_2 bezw. mit L_3 und L_2 verbunden. Die Summe der beiden Wattmeterangaben ist dann die Leistung der Maschine. c) Ist ein Nullleiter vorhanden, so erfordert die Messung bei ungleicher Belastung der drei Phasen immer drei Einphasen-Wattmeter, deren Spannungsspulen mit dem Hauptleiter, in den ihre Stromspule eingeschaltet ist, und mit dem Nullleiter verbunden werden.

Diese Messungen können ev. auch nach einander mit nur einem Wattmeter ausgeführt werden, wenn man dasselbe mittels Umschalters nacheinander auf die entsprechenden Phasen schaltet.

5. **Elektrizitätszähler.** Diese haben die Aufgabe, die an den einzelnen Konsumstellen einer Zentrale verbrauchte elektrische Energie zu messen und so zu registrieren (zusammenzuzählen), dass man den Stromkonsum entweder ohne weiteres ablesen oder durch eine einfache Berechnung bestimmen kann.

Der einfachste Fall ist der, dass nur ein Apparat angeschlossen ist, der stets dieselbe bekannte Energie verbraucht. Es genügt dann, die Zeit zu kennen, während deren der Stromkreis geschlossen ist (Zeitzähler).

Wenn die Spannung an der Konsumstelle konstant bleibt, so hängt die verbrauchte elektrische Energie lediglich von der Elektrizitätsmenge ab. Wird diese (in Amperestunden) gemessen, so erhält man die konsumierten Wattstunden durch Multiplikation mit der Netzspannung. Zähler, die nur die Amperestundenzahl registrieren, nennt man Amperestunden- oder Coulombzähler.

Da die Netzspannung, an der Konsumstelle gemessen, bei einer ausgedehnten Anlage nicht konstant gehalten werden kann, vielmehr Schwankungen nach oben oder unten unvermeidlich sind, so werden Amperestundenzähler, obschon sie einfacher und billiger sind, weniger benutzt. Meistens verwendet man Zähler, die so eingerichtet sind, dass die Wattstunden- bezw. Kilowattstundenzahl registriert wird; man nennt derartige Apparate Wattstundenzähler.



Fig. 234.

Mit Rücksicht auf die Konstruktion unterscheidet man zwischen Uhren- und Motorzählern.

a) Der Aron-Zähler (Uhrenzähler). An dem unteren Ende eines Pendels ist ein Magnet m befestigt (s. Fig. 234). Befindet sich unterhalb m eine Drahtspirale s, deren Windungen horizontal liegen, so wirkt, wenn

ein elektrischer Strom durch die Spule fliesst, ausser der Schwerkraft (und dem Erdmagnetismus) noch die anziehende oder abstossende Kraft der Spule auf den Magnet. Das Pendel schwingt also langsamer oder schneller, wenn durch die Spule ein Strom fliesst. Man wählt die Stromrichtung so, dass das Pendel schneller schwingt, als wenn die Spule stromlos ist. Das linke Pendel trägt an seinem unteren Ende ein Messinggewicht und wird durch den Strom nicht beeinflusst. Nennen wir die Schwingungszahlen des linken und rechten Pendels N und N', so ist N = N', wenn J = o. Ist aber J > o, so ist N' > N, und man kann es erreichen, dass N' — N proportional J gesetzt werden darf. Die Bewegung der Pendel wird auf ein gemeinsames Zählwerk übertragen und zwar in der Weise, dass beide Pendel das Zählwerk im entgegengesetzten Sinne beeinflussen. Haben also beide Pendel dieselbe Schwingungszahl (J = o), so bleibt das Zählwerk stehen; wird aber das rechte Pendel durch den Konsumstrom, der die Spule *s* durchfliessen muss, beschleunigt, so wird die Achse des Zählwerks gedreht, und zwar um so schneller, je grösser J ist. Der Apparat gehört also zu den Amperestundenzählern.

Soll das Instrument in einen Wattstundenzähler umgeändert werden, so muss der Magnet *m* in Fig. 234 durch eine Spule mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes ersetzt werden, die nebst einem Vorschaltwiderstande im Nebenschlusse liegt (wie die Spannungsspule eines Wattmeters). Der durch die Pendelspule fliessende Strom i ist also stets der Netzspannung E proportional. Die beschleunigende Kraft ist die elektrodynamische Wirkung, die die beiden Spulen aufeinander ausüben, ist also proportional J . i und mithin auch proportional J . E. N' — N hängt also jetzt von der elektrischen Energie ab, die an der Konsumstelle verbraucht wird.

Die älteren Aron-Zähler litten an verschiedenen Übelständen, zu denen auch das Aufziehen der Uhrwerke gehörte. Die Mängel sind bei den vervollkommneten Uhrenzählern beseitigt. Um eine möglichst grosse Differenz der Schwingungszahlen zu erzielen, werden zunächst kurze und leichte Pendel benutzt. Jedes Pendel macht normal ca. 12000 Schwingungen in der Stunde und bei normaler Belastung ca. 2500 Schwingungen stündlich mehr oder weniger.

Jedes Pendel trägt eine Spannungsspule, und zu jedem gehört eine Stromspule. Die Stromrichtungen werden derartig gewählt, dass der Gang des einen Pendels beschleunigt und der des anderen verzögert wird. Die Differenz der Schwingungszahlen ist der verbrauchten elektrischen Energie proportional. Jedes Pendel wirkt auf ein Uhrwerk; diese beiden Uhrwerke arbeiten so auf ein drittes Werk, das Differentialwerk, dass letzteres die Differenz der Schwingungszahlen auf das Zählwerk überträgt.

Das Aufziehen der beiden Uhrwerke besorgt der elektrische Strom selbst. Der wichtigste Teil des Aufzugs ist ein Elektromagnet, der auf einen schwingenden Anker wirkt und von Zeit zu Zeit eingeschaltet wird.

Wenn im stromlosen Zustande die beiden Pendel einen Gangunterschied aufweisen, so wird der Zähler, auch wenn der Konsument keinen Strom verbraucht, registrieren und ausserdem den wirklichen Stromverbrauch falsch messen. Um Gangfehler zu eliminieren, ist eine besondere Vorrichtung (Umschaltvorrichtung) vorhanden, durch die in Perioden von etwa 20 Sekunden die Drehungsrichtung des Zählwerks abwechselnd umgekehrt wird.

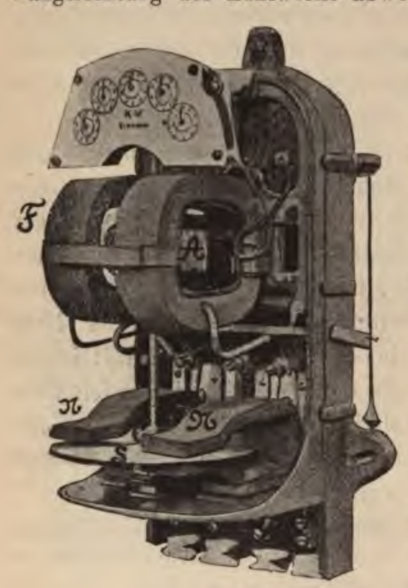


Fig. 235.

Die Zähler können für Gleichstrom und Wechselstrom Verwendung finden. Denn bei Wechselstrom ändert sich die Richtung des Stromes in der Hauptstromspule und in der zugehörigen Nebenschlussspule gleichzeitig (wenn keine Phasenverschiebung stattfindet). Wenn also eines der Pendel bei einer bestimmten Stromrichtung beschleunigten Gang hat, so hat es diesen auch, wenn sich der Strom umkehrt.

b) Die Motorzähler (auch Thomson-Zähler genannt) sind Wattstundenzähler. Sie zeichnen sich durch grosse Einfachheit der Konstruktion und lautlosen Gang aus und haben, da sie allen Anforderungen genügen, grosse Verbreitung gefunden. Der Hauptteil des Zählers ist ein kleiner Elektromotor, der

aus zwei vom Hauptstrome durchflossenen dickdrähtigen Spulen *F* (Fig. 235) und einem gewöhnlich mit Trommelwickelung versehenen leichten Anker mit Kollektor und Bürsten besteht. Die Trommelwickelung wird aus sehr dünnem Drahte hergestellt und liegt mit einem grossen vorgeschalteten Widerstand im Nebenschluss; sie wird also stets von einem der Spannung proportionalen Strome durchflossen. Wird an der Konsumstelle Strom verbraucht, so fliesst dieser durch die Feldspulen, und der Anker gerät in Rotation. Soll nun die Drehungsgeschwindigkeit des Ankers, dessen Bewegung auf das Zählwerk übertragen wird, bei verschiedenen Belastungen dem Stromkonsum proportional sein, so muss dem Motor Gelegenheit gegeben werden, Arbeit zu leisten. Um dies zu erreichen, wird auf der Ankerachse eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe *S* befestigt, die sich durch magnetische Felder bewegt, wenn der Anker rotiert. Die Magnetfelder werden durch die Pole der beiden Hufeisenmagnete *N* gebildet. Bei der Rotation der Scheibe entstehen in ihr Wirbelströme, die eine solche Richtung haben, dass sie die Bewegung der Scheibe zu hemmen suchen.

c) Doppeltarifzähler. Viele Elektrizitätswerke geben am Tage die elektrische Energie zu einem herabgesetzten Preise ab. Man muss dann entweder zwei Zähler einschalten oder einen Doppeltarifzähler verwenden. In beiden Fällen muss zu einer bestimmten Zeit eine Umschaltung erfolgen. Diese Umschaltung besorgt eine Pendeluhr, die von Hand oder elektrisch aufgezogen wird. In der Regel ist das Zifferblatt der Uhr in 2×12 Stunden eingeteilt, und es sind auf ihm ausser dem Zeitzeiger zwei mit dem Buchstaben A. h. T. (Anfang hohen Tarifs) und E. (Ende) bezeichnete, verstellbare kleine Zeiger angebracht. Durch Verstellen der beiden letzteren Zeiger (Stellzeiger) kann man Anfang und Ende des hohen Tarifs auf eine beliebige Zeit verlegen. Kommt der Zeitzeiger mit einem der Stellzeiger zur Deckung, so wird für kurze Zeit ein neuer Stromkreis geschlossen, durch den ein Elektromagnet erregt wird, der die Umschaltung besorgt.

Die eigentlichen Doppeltarifzähler haben entweder ein oder

zwei den Energieverbrauch anzeigende Zählwerke. Im ersteren Falle wird die Anordnung so getroffen, dass sich bei jeder Umschaltung die Geschwindigkeit ändert, mit der die Zeiger des Zählwerkes vorrücken. Enthält der Zähler zwei Zählwerke, so wird bei der Umschaltung das obere oder untere Zählwerk mit der Drehungsachse gekuppelt, so dass man erkennen kann, wieviel Kilowattstunden der Konsument zu dem einen und wieviel er zu dem anderen Preise verbraucht hat.

Anhang.

Das absolute Maßsystem.

Messen heisst soviel wie vergleichen. Dasjenige, mit dem man die zu messende Grösse vergleicht, nennt man die Maßeinheit.

Es ist das Verdienst von Gauss und W. Weber, alle physikalischen Einheiten von drei Einheiten, nämlich der Längeneinheit, der Masseneinheit und der Zeiteinheit unter Benutzung von Naturgesetzen abgeleitet zu haben. Sie wählten als Grundeinheiten das Millimeter, das Milligramm und die Sekunde. Jetzt geht man in der Physik von dem Centimeter, dem Gramm und der Sekunde aus.

Das Gramm [1]) ist die Maßeinheit für die Masse. Unter der Masse eines Körpers versteht man die Menge des Stoffes (der Materie), die der Körper enthält. Ein Kilogramm Wasser hat eine gerade so grosse Masse wie ein Kilogramm Quecksilber. Wenn man 1 gr Luft zusammenpresst, so nimmt das Volumen ab, die Masse aber bleibt unverändert. Wird 1 Liter Wasser von 100^0 in Dampf von 100^0 verwandelt, so entstehen ca. 1600 Liter Wasserdampf; diese haben dieselbe Masse wie das Liter Wasser von 100^0 (s. auch Fussnote 2 S. 429).

Das Maßsystem, das auf den genannten Einheiten aufgebaut ist, nennt man das absolute oder C.G.S-System [2]).

1. **Einheit der Geschwindigkeit.** Unter der Geschwindigkeit eines Körpers versteht man den in der Zeiteinheit, also in 1 Sekunde, von dem Körper zurückgelegten Weg [3]). Ein Körper hat also die Geschwindigkeit Eins, wenn er in 1 Sekunde einen Weg von 1 cm zurücklegt.

---

1) Statt der Abkürzung g bedienen wir uns im Folgenden der Abkürzung gr.

2) C, G, S sind die Anfangsbuchstaben von Centimeter, Gramm, Sekunde.

3) Diese Erklärung gilt nur für den Fall, dass die Bewegung eine gleichförmige ist.

Beispiel: Wenn ein Eisenbahnzug mit konstanter Geschwindigkeit fährt und in 1 Stunde 70 km zurücklegt, so ist seine Geschwindigkeit, in C.G.S-Einheiten ausgedrückt, gleich $\frac{70.1000.100}{3600}$ (cm pro sek., abgekürzt cm/sek.).

2. **Einheit der Beschleunigung.** Wenn eine konstante Kraft einige Zeit auf einen Körper einwirkt, so wächst die Geschwindigkeit des Körpers gleichmässig, d. h. sie nimmt in jeder Sekunde um denselben Betrag zu. Den Zuwachs der Geschwindigkeit pro Sekunde nennt man die Beschleunigung. Als Beispiel werde der freie Fall gewählt. Jedes Massenteilchen wird von der Erde angezogen; die Grösse der Kraft, mit der ein Körper von der Erde angezogen wird, wird mit Hülfe der Wage bestimmt. Diese Kraft erteilt dem fallenden Körper eine Beschleunigung. Sieht man von dem Widerstande der Luft ab, erfolgt also der Fall im luftleeren Raume, so ist die Geschwindigkeit am Ende der ersten Sekunde 981 cm, d. h. wenn die Schwerkraft am Ende der ersten Sekunde aufhörte zu wirken, so würde der fallende Körper in jeder folgenden Sekunde 981 cm zurücklegen; die Geschwindigkeit am Ende der zweiten Sekunde ist 2.981 cm etc. Die Beschleunigung beträgt also in unserem Falle 981 C.G.S-Einheiten (cm/sek.).

Die Beschleunigung eines Körpers ist gleich der Einheit der Beschleunigung, wenn der Zuwachs der Geschwindigkeit pro Sekunde 1 cm beträgt.

3. **Einheit der Kraft (Dyne).** Wenn wir sehen, dass ein Körper (eine Masse) aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung übergeht, so schliessen wir, dass eine Kraft auf den Körper einwirkt. (Die Bewegung ist die Wirkung, die Kraft die Ursache.) Wir messen eine Kraft, indem wir die durch sie hervorgerufene Wirkung messen. Finden wir, dass eine Masse von 1 gr durch eine Kraft p die Beschleunigung 10 cm und in einem zweiten Falle durch eine Kraft q die Beschleunigung 20 cm erfährt, so schliessen wir, dass q doppelt so gross wie p ist. Beobachten wir ferner, dass einer Masse von 2 gr die Beschleunigung 1 cm mitgeteilt wird und dass eine Masse von 1 gr dieselbe Beschleunigung durch eine andere Kraft erfährt, so sagen wir, dass im ersteren Falle die Kraft doppelt so gross ist wie im letzteren Falle. Die Grösse einer Kraft ist also sowohl proportional der bewegten

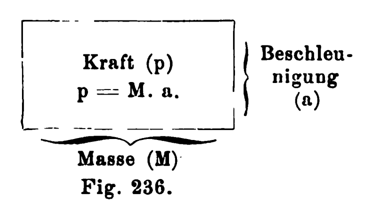


Fig. 236.

Masse als auch proportional der der Masse erteilten Beschleunigung (s. Fig. 236).

Diejenige Kraft, die der Masseneinheit (einem 1 Gramm schweren Körper) die Beschleunigung Eins (1 cm) erteilt, heisst Dyne [1]) (Krafteinheit).

Das Gramm wird auch als Maß für eine Kraft angesehen. Im gewöhnlichen Leben versteht man unter Gramm ein Gewicht, und das Gewicht eines Körpers ist ein Maß für die Schwerkraft. Um Verwirrung zu vermeiden, wollen wir, wenn wir unter Gramm die Maßeinheit für die Masse [2]) verstehen, den Ausdruck „Massengramm" gebrauchen und, wenn wir Gramm als Kraft angesehen wissen wollen, „Kraftgramm" sagen.

Wenn ein Gramm Eisen (Massengramm) fällt, so ist die auf das Eisen wirkende Kraft die Schwerkraft, also ein Kraftgramm. Diese Kraft erteilt dem Eisen (dem Massengramm) eine Beschleunigung von 981 cm. Also ist

$$1 \text{ Kraftgramm} = 981 \text{ Dynen},$$

denn 1 Kraftgramm erteilt der Masseneinheit (der Masse des Eisens) eine 981 mal grössere Beschleunigung, als eine Dyne sie der Masseneinheit erteilt. Es folgt

$$1 \text{ Dyne} = \frac{1}{981} \text{ gr (Kraftgramm)} = 1{,}02 \text{ mg}.$$

Denken wir uns also an einem gewichtlosen Faden ein kleines 1,02 Milligramm schweres Körperchen befestigt, so ist die Kraft mit der der Faden gespannt wird, gleich 1 Dyne.

Da die Kraft, mit der 1 Kilogramm (z. B. 1 Liter Wasser) von der Erde angezogen wird, gleich 1000 Kraftgramm ist, so ist

$$1 \text{ Kraftkilogramm} = 981000 \text{ Dynen}^{3)}. \quad . \quad . \quad (1)$$

4. Einheit der Arbeit (Erg). Da die Arbeit, die von einer Kraft geleistet wird, gemessen wird durch das Produkt aus der Kraft und dem Wege, den der Angriffspunkt der Kraft zurücklegt, so ist die Einheit der Arbeit diejenige Arbeit, die durch eine Kraft von 1 Dyne verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft einen Weg von 1 cm zurücklegt. Die so definierte Arbeit

---

1) Von δύναμις = Kraft abgeleitet.

2) Wenn man annimmt, dass alle Elemente aus ein und derselben Urmaterie entstanden sind, die aus kleinsten Teilchen (Korpuskeln) zusammengesetzt ist, so ist die Anzahl der in einem Körper enthaltenen Korpuskeln ein Maß für die Masse. 1 gr Wasser enthält gerade soviel Korpuskeln wie 1 gr Quecksilber.

3) Statt dessen sagt man auch, dass 1 Kraftkilogramm = 981000 C.G.S-Einheiten ist. Die Masse eines Kilogramms (Eisen, Wasser etc.) ist gleich 1000 C.G.S-Einheiten.

heisst 1 Erg (von ἔργον die Arbeit). Heben wir also ein 1,02 mg schweres Körperchen 1 cm hoch, so leisten wir eine Arbeit von 1 Erg (man vergl. die Anm. auf S. 4).

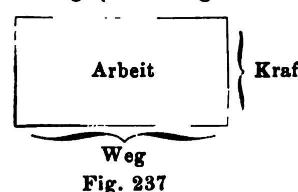


Fig. 237

In der Technik benutzt man als Maßeinheit für die Arbeit 1 Meterkilogramm (s. S. 4). Wieviel Erg ist nun 1 Meterkilogramm? Heben wir 1 kg, so müssen wir eine Kraft von 981000 Dynen aufwenden; der Weg beträgt 100 C.G.S-Einheiten. Mithin ist

$$1 \text{ mkg} = 981000 \,.\, 100 \text{ Erg} = 981 \,.\, 10^5 \text{ Erg} \quad . \; . \quad (2)$$

Die von einer 1-pferdigen Maschine in 1 Sek. geleistete Arbeit ist gleich $75 \,.\, 981 \,.\, 10^5$ Erg $= 736 \,.\, 10^7$ Erg (abgerundet).

Eine Arbeit von 10^7 Erg wird 1 Joule genannt

$$1 \text{ Joule} = 10^7 \text{ Erg} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Bei einem Gewitter fallen 1000 m^3 Wasser mit 8 m Endgeschwindigkeit ins Meer; wie gross ist die entsprechende Wärme? Die lebendige Kraft des Wassers (sein Arbeitsvermögen) in C.G.S-Einheiten ist gleich $\frac{1}{2} \,.\, 10^9 \,.\, 800^2$ Erg (allgemein $\frac{1}{2}\, m v^2$). Diese werden in mkg verwandelt, indem man durch $981 \,.\, 10^5$ dividiert (s. Gleichg. 2). Endlich ist zu berücksichtigen, dass 1 Calorie = 426 mkg.

5. **Einheit des Effektes, Watt.** Unter Effekt einer Maschine, eines Vorganges etc. versteht man die in 1 Sek. verrichtete Arbeit. Ist also bei einer Maschine die Leistung pro Sekunde 1 Erg, so ist der Effekt gleich der Einheit des Effektes. Der Effekt, auch die Leistung genannt, ist also ein Maß für die Arbeitsfähigkeit. Da die eben definierte Einheit des Effektes unbequem klein ist, so hat man sie nicht besonders benannt; vielmehr hat man dem 10^7mal grösseren Effekte einen besonderen Namen beigelegt, nämlich 1 Watt.

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joule pro Sek.} = 10^7 \text{ Erg pro Sek.} \quad . \quad (4)$$

Der Effekt einer 1-pferdigen Maschine ist, wie eben abgeleitet wurde, gleich $736 \,.\, 10^7$ Erg. Mithin

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt.}$$

6. **Einheit des Magnetismus.** Ein Pol hat den Magnetismus Eins (ist ein Einheitspol), wenn er einen gleich starken gleichnamigen Pol, der sich in der Entfernung 1 cm von ihm befindet, mit einer Kraft abstösst, die gleich 1 Dyne ist. (Näheres s. S. 14.)

7. **Einheit der Feldstärke.** An einer Stelle eines magnetischen Feldes herrscht die Feldstärke Eins, wenn ein dort befindlicher punktförmig gedachter Einheitspol mit einer Kraft von 1 Dyne vorwärts getrieben wird.

Analog ist die Definition für die Einheit der elektrischen Feldstärke.

8. **Einheit der Elektrizitätsmenge und der Stromstärke.** Geht man bei der Definition für die Einheit der Elektrizitätsmenge von der Tatsache aus, dass zwei elektrisch geladene Körper sich anziehen oder abstossen bezw. von dem Coulombschen Gesetze, so erhält man die Einheit im elektrostatischen Maßsystem.

Eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ist diejenige Elektrizitätsmenge, die eine ihr gleiche in der Entfernung 1 cm mit der Kraft 1 Dyne abstösst. (Näheres s. S. 33.)

Fliesst diese Elektrizitätmenge in 1 Sek. durch einen Querschnitt eines Leiters, so ist die Stromstärke gleich einer elektrostatischen Einheit.

Aus praktischen Gründen hat man, obschon eine Notwendigkeit hierfür nicht vorliegt, in der Lehre von der fliessenden Elektrizität eine andere Einheit gewählt. Bei ihrer Definition geht man von dem Biot-Savartschen Gesetze aus. Da die zugrunde liegende Erscheinung eine elektromagnetische ist, so nennt man das betreffende Maßsystem das elektromagnetische Maßsystem.

Ein Strom hat die Stärke Eins (einer elektromagnetischen Einheit), wenn er im Mittelpunkte eines von ihm durchflossenen (unendlich dünnen) Drahtkreises vom Radius 1 cm ein Feld von $2\,\pi$ Einheiten erzeugt (s. S. 94).

In der Praxis wählt man als Einheit den zehnten Teil der (absoluten) elektromagnetischen Einheit; diese wird 1 Ampere genannt.

$$1 \text{ Amp.} = \frac{1}{10} \text{ elektromagn. C.G.S-Einheit der Stromstärke.}$$

Die absolute elektromagnetische Stromeinheit ist $3 \cdot 10^{10}$ mal so gross wie die absolute elektrostatische Stromeinheit.

1 absolute elektromagnetische Stromeinheit $= 3 \cdot 10^{10}$ elektrostatischen Stromeinheiten . . . . (5)

1 Amp. $= 3 \cdot 10^{9}$ elektrostatischen Einheiten . . (6)

Im elektromagnetischen Maßsystem ist die Einheit der Elektrizitätsmenge diejenige Elektrizitätsmenge, die in 1 Sekunde durch einen Drahtquerschnitt fliesst, wenn die Stromstärke gleich einer absoluten elektromagnetischen Stromeinheit ist. Sie ist $3 \cdot 10^{10}$ mal grösser als die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge.

Der zehnte Teil der eben definierten Elektrizitätsmenge heisst 1 Coulomb. Man kann auch definieren: 1 Coulomb ist diejenige Elektrizitätsmenge, die durch einen Strom von 1 Ampere in 1 Sekunde durch einen Drahtquerschnitt befördert wird.

1 Coulomb $= 3 \cdot 10^{9}$ elektrostatischen Einheiten der Elektrizitätsmenge . . . . (7)

9. **Das Potential, Einheit des Potentials.** Der Begriff Potential wurde in Kap. 3 ausführlich besprochen. Es sei hier kurz seine Definition wiederholt. Die Arbeit, die geleistet oder gewonnen wird, wenn eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge aus sehr grosser Entfernung (aus der Unendlichkeit) bis zu einem Punkte A eines elektrischen Feldes geschafft werden soll, heisst das Potential im Punkte A.

Die grosse Bedeutung dieses Begriffes ergibt sich, wenn man beachtet, dass das Potential gleich der potentiellen Energie ist, die die Elektrizitätsmenge Eins im Punkte A besitzt [1]).

Das Potential in A ist gleich einer absoluten elektrostatischen Einheit, wenn die Arbeit, die aufzuwenden ist oder gewonnen wird, um eine elektrostatische Einheit positiver Elektrizität aus dem Unendlichen nach A zu schaffen, gleich ist 1 Erg.

Zwischen zwei Punkten besteht die Potentialdifferenz Eins (im elektrostatischen Maßsystem), wenn die Arbeit 1 Erg erforderlich ist (oder gewonnen wird), um eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge von dem einen zum anderen Punkte zu befördern.

Potentialdifferenz im elektromagnetischen Maßsystem. An den Enden eines Leiters besteht die elektromagnetische Einheit der Potentialdifferenz, wenn ein in ihm fliessender Strom Eins (10 Amp.) in 1 Sekunde die Arbeit 1 Erg leistet. Diese neue Einheit ist $3 \cdot 10^{10}$ mal kleiner als die vorige; denn die Arbeit 1 Erg wird jetzt von einer $3 \cdot 10^{10}$ mal grösseren Elektrizitätsmenge geleistet.

Da diese Einheit im Vergleich zu den Potentialdifferenzen der galvanischen Elemente sehr klein ist [2]), so hat man als technische Einheit den 10^8-fachen Betrag gewählt; diese heisst 1 Volt.
1 Volt $= 10^8$ elektromagnetischen Einheiten der Potentialdifferenz $= \frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}} = \frac{1}{300}$ elektrostat. Ein. der Potentialdiff. oder

$$1 \text{ elektrostat. Einheit der Potentialdifferenz} = 300 \text{ Volt.} \quad (8)$$

Aufgaben: An den Enden eines Leiters bestehe die Potentialdifferenz 1 Volt, durch den Leiter fliesse ein Strom von 1 Amp.; wie gross ist die in 1 Sek. entwickelte Wärmemenge? Man drücke die Potentialdifferenz und die Stromstärke in elektrostatischen Einheiten aus und bestimme die Arbeit in Erg $(= \frac{1}{300} \cdot 3 \cdot 10^9 =$

1) Sie entspricht der potentiellen Energie, die ein emporgehobenes Gewicht infolge seines Abstandes von der Erdoberfläche hat.

2) Für ein Daniell-Element würde sie etwas mehr als 10^8 sein.

10^7 Erg). Diese verwandle man in Meterkilogramme (Gleichung 2) und beachte, dass 426 mkg = 1000 cal.

Zwei Kugeln, deren Mittelpunkte eine Entfernung von 1 km haben, seien je mit 1 Coulomb positiver Elektrizität geladen (denkbar, aber nicht ausführbar); wie gross ist die Kraft, in Kilogrammen ausgedrückt, mit der sich die Kugeln abstossen?

Nach dem Coulombschen Gesetze ist

$$k = \frac{m \,.\, m'}{r^2} \text{ Dynen,}$$

wenn m und m' in elektrostatischen Einheiten und r in Centimetern ausgedrückt werden. $m = m' = 3 \,.\, 10^9$, $r = 10^5$. Mithin

$$k = \frac{9 \,.\, 10^{18}}{10^{10}} = 9 \,.\, 10^8 \text{ Dynen} = \frac{9 \,.\, 10^8}{981 \,.\, 10^5} \text{ kg (mehr als 900 kg).}$$

10. **Einheit des Widerstandes.** Da $e = iw$, so folgt, dass $w = 1$, wenn $i = 1$ und $e = 1$. Daher gilt folgende Definition:

Ein Leiter hat den absoluten Widerstand Eins, wenn die absolute elektromagnetische Einheit der Potentialdifferenz in ihm den Strom Eins (10 Amp.) hervorruft.

Diese Einheit hat keinen besonderen Namen. Als technische Einheit des Widerstandes dient 1 Ohm. Darunter versteht man den Widerstand, den ein Leiter hat, wenn an seinen Enden eine Potentialdifferenz von 1 Volt besteht und durch diese ein Strom von 1 Amp. erzeugt wird.

Wenn man 1 Ohm mit der zuerst definierten Einheit des Widerstandes vergleichen will, so muss man berücksichtigen, dass, wenn eine 10^8-mal grössere Potentialdifferenz (s. Gleichung 8) den gleichen Strom durch einen Widerstand treibt, dieser Widerstand 10^8-mal grösser ist, ferner dass der Widerstand 10-mal grösser ist, wenn der Strom 10-mal schwächer ist.

$$1 \text{ Ohm} = 10^8 \,.\, 10 = 10^9 \text{ elektromagn. C.G.S-Einheiten.} \qquad (9)$$

11. **Einheit der Leistung des elektrischen Stromes.** Die elektrische Energie, die in einem Leiter in 1 Sekunde in andere Energieformen umgesetzt wird, ist gleich der Potentialdifferenz an den Enden des Leiters, multipliziert mit der Stromstärke. Die Arbeit, die pro Sek. in einem Leiter geleistet wird, wenn er vom Strome 1 Amp. durchflossen wird und an seinen Enden eine Potentialdifferenz von 1 Volt besteht, wird 1 Volt-Amp. genannt.

Nun ist 1 Volt = 10^8 absoluten Einheiten und 1 Amp. = $\frac{1}{10}$ absolute Einheit; mithin ist

$$1 \text{ Volt-Amp.} = 10^8 \,.\, \frac{1}{10} = 10^7 \text{ Erg pro Sekunde.}$$ Diese Leistung wurde aber 1 Watt genannt (s. Gleichung 3). Daher ist

1 Volt-Ampere = 1 Watt.

12. **Einheit der Kapazität.** Unter der Kapazität eines Leiters versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, die man dem Leiter zuführen muss, um ihn auf das Potential Eins aufzuladen. Man kann die Kapazität in elektrostatischen und in elektromagnetischen Einheiten ausdrücken.

Ein Körper hat die Kapazität Eins im elektrostatischen Maßsystem, wenn er dadurch, dass man ihm eine elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge zuführt, auf eine elektrostatische Einheit des Potentials geladen wird. Entsprechend lautet die Definition für die elektromagnetische Einheit der Kapazität. Diese letztere Einheit ist $9 \cdot 10^{20}$-mal grösser als die elektrostatische; denn durch eine $3 \cdot 10^{10}$-mal grössere Elektrizitätsmenge (s. Nr. 5) wird der Leiter auf ein $3 \cdot 10^{10}$-mal kleineres Potential geladen.

1 elektromagn. Einh. der Kapazität $= 9 \cdot 10^{20}$ elektrost. Einh.

Ein Leiter, der durch 1 Coulomb auf das Potential 1 Volt geladen wird, hat eine gewisse Kapazität, die als 1 Farad bezeichnet wird. 1 Farad ist zunächst 10-mal kleiner als 1 elektromagnetische Einheit, da 1 Coul. $= \frac{1}{10}$ absolute elektromagnetische Einheit; durch 1 Coul. wird der Leiter auf 10^8 elektromagnetische Einheiten des Potentials geladen, mithin ist ein Farad noch 10^8-mal kleiner als die elektromagnetische C.G.S-Einheit.

1 Farad $= 10^{-9}$ elektromagn. absol. Einh. der Kapazität.

Da 1 Farad eine ausserordentlich grosse Kapazität ist (vom praktischen Standpunkte aus), so drückt man Kapazitäten meistens in Mikrofarad aus.

1 Mikrofarad $= 10^{-6}$ Farad $= 10^{-15}$ elektromagn. Einh.

Wird eine Kugel vom Radius r mit e elektrostatischen Einheiten geladen, so ist ihr Potential, in elektrostatischen Einheiten ausgedrückt, gleich $\frac{e}{r}$. Daraus folgt, dass eine Kugel vom Radius 1 cm durch 1 elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge auf das Potential Eins geladen wird. Hat die Kugel einen Radius von 2 cm, so muss man ihr 2 elektrostatische Einheiten der Elektrizitätsmenge zuführen, wenn man sie auf 1 elektrostatische Einheit des Potentials laden will etc. Die Kapazität einer Kugel in elektrostatischen Einheiten wird also durch dieselbe Zahl ausgedrückt wie der Radius, d. h. $C = r$. So erklärt es sich, dass man Kapazitäten in Centimetern ausdrückt. Ein Körper hat also eine Kapazität von 10 cm, wenn seine Kapazität gleich ist derjenigen einer Kugel von 10 cm Radius.

13. **Koeffizient der gegenseitigen Induktion.** Befindet sich in der Nähe eines Stromkreises A ein Drahtkreis B, so wird derselbe, wenn die Stromstärke in A von 0 bis i steigt, von einer

gewissen Anzahl von Kraftlinien geschnitten. Diese ist proportional i, kann also gleich B.i gesetzt werden. B heisst der Koeffizient der gegenseitigen Induktion; sein Wert hängt ab von den geometrischen Verhältnissen. B ist zugleich die im zweiten Leiter induzierte elektromotorische Kraft (in elektrom. Einheiten), wenn sich der Strom in A in 1 Sek. um eine elektromagnetische Einheit ändert.

14. **Selbstinduktionskoeffizient.** L ist die Anzahl von Schnitten der Leiterfläche mit den Kraftlinien, welche der Leiter selbst erzeugt, wenn in ihm ein Strom fliesst, dessen Stärke gleich 1 elektromagnetischen Einheit (= 10 Amp.) ist. L ist zugleich die in dem Leiter selbst induzierte elektromotorische Kraft, wenn sich der Strom in 1 Sek. um 10 Amp. ändert.

Der Selbstinduktionskoeffizient eines Leiters ist gleich einer absoluten Einheit, wenn eine Stromänderung um eine absolute Einheit (10 Amp.) pro Sekunde in ihm eine absolute (elektromagn.) Einheit der elektromotorischen Kraft erzeugt.

Die technische Einheit des Selbstinduktionskoeffizienten heisst 1 Henry. Der Koeffizient der Selbstinduktion ist gleich 1 Henry, wenn bei einer Stromänderung um 1 Amp. pro Sek. eine elektromotorische Kraft gleich 1 Volt erzeugt wird.

Da 1 Volt = 10^8 C.G.S-Einheiten und 1 Amp. = $\frac{1}{10}$ C.G.S-Einheit, so ist

$$1 \text{ Henry} = 10^9 \text{ absoluten Einheiten.}$$

Sachregister.

(Die Zahlen geben die Seiten an.)

A.

B.

---

1) Siehe auch Resonanz.

C.

(Siehe auch K.)

D.

E.

1) Siehe auch Wärmetönung.

F.

G.

H.

I.

J.

K.

L.

P.

Q.

R.

T.

U.

V.

W.

Z.

Leipzig,
Walter Wigand's Buchdruckerei.

Verlag von **Otto Wigand** in **Leipzig.**

Die Akkumulatoren,

ihre Theorie, Herstellung, Behandlung, Verwendung

mit

Berücksichtigung der neueren Sammler.

Von

Dr. W. Bermbach
in Cöln.

Mit 25 Abbildungen.

Preis 3 Mark.

Verlag von Otto Wigand in Leipzig

Die wichtigsten

Grundbegriffe der Elektrochemie

und ihre

Verwertung bei den neueren Theorien

der

galvanischen Elemente und Akkumulatoren.

Von

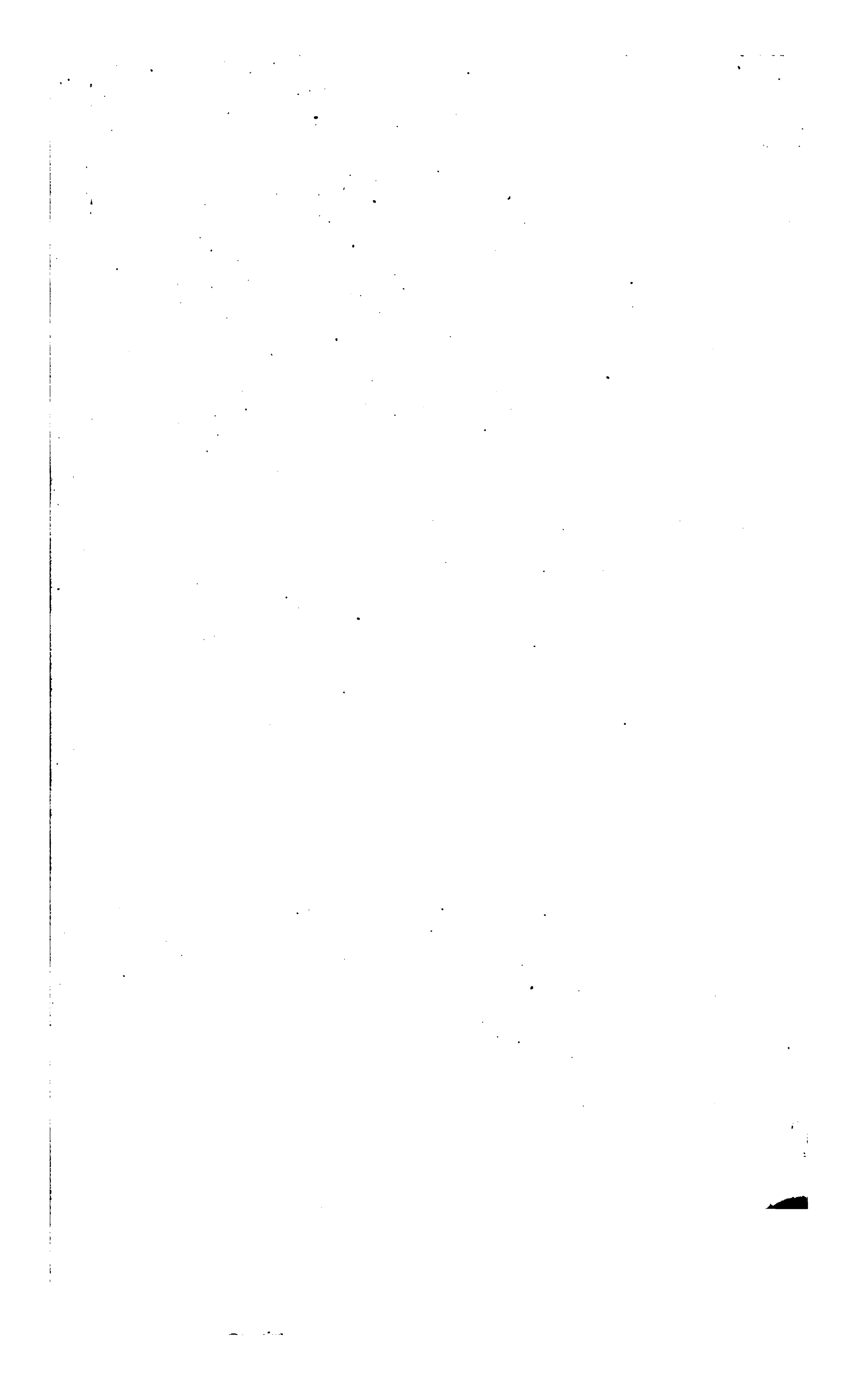
Dr. W. Bermbach.

Mit sechs Abbildungen.

Preis 1 Mark.







MAR 7 1939

